Énergie, Mines et Ressources Canada
Energy, Mines and Resources Canada

CANMET

Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie
Canada Centre for Mineral and Energy Technology

PRÉSENTATION DE SYSTÈMES SISMIQUES UTILISÉS EN AFRIQUE DU SUD

LABORATOIRES DE RECHERCHE MINIÈRE

SP86-10F

Canada

PRÉSENTATION DE SYSTÈMES SISMIQUES UTILISÉS EN AFRIQUE DU SUD

par

W. Bawden
F. Kitzinger

CENTRE DE RECHERCHE NORANDA

pour

CANMET
DOSSIER, MAS N° 23440-5-9110
PROJET, CANMET N° 142509
CONTRAT, MAS N° 1SQ.85-00184
AUTORITÉ SCIENTIFIQUE AU CANMET : C.B. Graham, Ing.

Janvier 1986

55 pp

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1987

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres libraires

ou par la poste auprès du

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38-15/86-10F au Canada: $7.95
ISBN 0-660-92126-X à l'étranger: $9.55

Prix sujet à changement sans préavis

AVANT-PROPOS

L'historique des mines canadiennes est parsemée d'événements pénibles ayant pour origine les coups de toit. La sécurité des mineurs canadiens repose en partie sur l'étude approfondie des coups de toit et des moyens à prendre pour solutionner le problème. Cette étude a pour objectif primordial la détection, le repérage et la caractérisation des coups de toit. La poussée actuelle de recherche dans ce domaine englobe les méthodes de repérage des sources d'énergie sismique, l'analyse des formes d'ondes et une méthode pour faire échec à l'information douteuse provenant des vibrations dispersées.

Le 11 octobre 1985, le ministère des Approvisionnements et Services a passé un contrat avec le Centre de Recherche Noranda en vue de concevoir un système de surveillance sismique avancé pour la détection des coups de toit dans les mines canadiennes. Grâce à ce contrat d'une valeur de 321 000 $, il sera possible de compléter la mise au point, dès le 15 octobre 1987, du prototype d'un système sismique ayant fait l'objet d'essais miniers et susceptible d'être fabriqué sur une échelle commerciale. Le système en voie de réalisation se situe à mi-chemin entre les systèmes de surveillance microsismique actuels et le réseau national de surveillance microsismique.

Un principe fondamental sous-jacent à toute activité de recherche se lit comme suit : "Point ne cherchera à réinventer la roue". En conformité avec ce principe, il importait d'effectuer, dans le cadre de ce contrat, une revue complète de toute l'information disponsible relative aux études sismiques effectuées dans les mines à l'échelle nationale et internationale avant de procéder à l'étape de la conception et de l'élaboration de l'équipement.

La suprématie de l'Afrique du Sud dans ce domaine étant reconnue dans le monde entier, une partie de l'étude est consacrée aux problèmes auxquels ce pays doit faire face et aux pratiques minières qui y sont utilisées. Un bref aperçu des problèmes que suscitent les coups de toit au sein de l'industrie minière sud-africaine permet d'apprécier toute la portée de la direction positive de ce pays. L'Afrique du Sud possède un effectif de 400 000 mineurs

qui exploitent un réseau minier comprenant certaines des mines les plus profondes de la terre. Environ 28 % de tous les accidents mortels (approximativement un par millier) qui se produisent annuellement sont causés par les coups de toit.

Comparativement, les dossiers de l'Ontario indiquent que 3 % de tous les accidents mortels qui surviennent dans les mines résultent des coups de toit! ce qui signifie un rapport de 25 à 1. Cette question épineuse a poussé les Sud-Africains à rechercher des techniques nouvelles pour détecter les bruits émanant des masses rocheuses. Le personnel de la Noranda a effectué une visite en Afrique du Sud afin d'étudier sur place, en compagnie d'experts du pays, les systèmes de surveillance sismique et d'obtenir des renseignements sur les progrès réalisés et les problèmes non résolus.

Une lecture du rapport de cette visite suffit à nous convaincre de l'importance et de la valeur de l'information considérable qu'il renferme pour quiconque s'intéresse aux problèmes découlant des coups de toit potentiels. Par conséquent, le rapport sera mis à la disposition de l'industrie minière canadienne par le truchement de la publication du présent rapport spécial du CANMET.

Les membres du Centre de Recherche Noranda qui étaient responables de l'étude d'ensemble et de l'organisation de la visite, W. Bawden et F. Kitzinger, méritent des félicitations pour la qualité de leurs travaux. Je désire, par la même occasion, exprimer ma reconnaissance au personnel des organismes et instituts miniers dont la précieuse collaboration a contribué à la réussite de cette étude.

John E. Udd
Directeur
Laboratoires de recherche minière

FOREWORD

Canadian underground mines have had a long, and sometimes painful, history of rockbursting. The safety of Canadian miners depends, in part, on a continuing study of the rockburst problem and the potential for alleviation. A pivotal issue in this study is rockburst detection, location and characterization. The current thrust includes improving source location methods, wave form analyses, and circumventing spurious information from stray vibrations caused by mining operations.

The Department of Supply and Services, on October 11, 1985, awarded to the Centre de Recherche Noranda a contract to develop a state-of-the-art mine seismic monitoring system for rockburst detection in Canadian mines. The $321,000 contract will provide, by October 15, 1987, a mine-tested prototype seismic system suitable for general fabrication. The system under development is intermediate to present mine microseismic monitoring systems and to the national seismic network.

A fundamental principle guiding efficient research is that unnecessary duplication must be avoided. In strict adherence to this principle, the contract required an exhaustive review of available information on mine seismic studies, both domestic and international, prior to proceeding to the conceptual equipment design stage.

Because they are the world leader in this technology, part of this review included a study of South African mine seismic systems and practices. It is only necessary to briefly describe the South African mining industry rockburst problem to appreciate the impetus that impelled this leadership. Within a network of the world's deepest mines, they employ 400,000 miners. Rockbursts account for about 28% of their mine accident 'fatality rate of approximately one per thousand per annum'.

The Ontario record, by comparison, shows rockbursts to cause about 3% of all mining accident fatalities; a twenty-five fold difference! This very significant problem has led the South Africans to devise new and different ways of

monitoring rock noises. The Noranda staff visited South Africa for direct discussion with their experts on mine seismic systems and to acquire first hand knowledge of advances and current difficulties.

Upon reading the visit report, it became evident that it contained considerable general information of value to anyone dealing with potential rockbursts. It was, therefore, decided to make the report available to the Canadian mining industry by issue of this special CANMET report.

The staff of the Centre de Recherche Noranda responsible for carrying out the survey and visit, Dr. Bawden and Mr. Kitzinger, are to be congratulated for the quality of the survey and the report. At the same time, I would like to express my appreciation to those whose cooperation made the success of this survey possible.

John E. Udd
Director
Mining Research Laboratories

TABLE DES MATIÈRES

Page

1. RENCONTRE AVEC DAVE ORTLEPP DE L'ANGLO AMERICAN CORPORATION LE 1er DÉCEMBRE 1985, À JOHANNESBURG 1

2. VISITE DE LA MINE WESTERN DEEP LEVELS, LE 3 DÉCEMBRE 1985, À CARLETONVILLE 2

   2.1 Description du système microsismique par Peter Mountfort, gestionnaire des services informatiques 3

   2.2 Description du réseau macrosismique ou du réseau à l'échelle de la mine par Peter Mountfort, gestionnaire des services informatiques 9

3. VISITE AUPRÈS DE STEVE SPOTTISWOODE DE LA MINE BLYVOORICHT, LE 3 DÉCEMBRE 1985, À CARLETONVILLE 12

4. DEUXIÈME RENCONTRE AVEC STEVE SPOTTISWOODE, BUREAU PRINCIPAL DE LA RAND MINES, LE 5 DÉCEMBRE 1985, À JOHANNESBURG 15

5. RENCONTRE AVEC R. GREEN DU BERNARD PRICE INSTITUTE FOR GEOPHYSICAL RESEARCH, LE 5 DÉCEMBRE 1985, À JOHANNESBURG 17

6. VISITE AUX LABORATOIRES DE RECHERCHE DE LA CHAMBER OF MINES, LE 6 DÉCEMBRE 1985, À JOHANNESBURG 19

   6.1 Rencontre avec Nick Gay 19

   6.2 Discussions avec Ken Patrick, ingénieur électricien 20

   6.3 Rencontre avec Johanne Churcher 22

   6.4 Rencontre avec Nigel Legge 23

   6.5 Futures réalisations de la Chamber of Mines 25

7. RÉUNION AVEC L'ANGLO AMERICAN CORPORATION À WELKOM, LE 9 DÉCEMBRE 1985 26

   7.1 Réunion avec B. Davies et M. Dix 26

   7.2 Manifestations sismiques tragiques dans la région de Welkom .. 26

   7.3 Rencontre avec Alexander Mendecki, sismologue à l'Anglo American Corporation à Welkom, État libre d'Orange 28

TABLE DES MATIÈRES (suite)

	Page
7.4 Réunion avec Rob Dixon de l'Anglo American Corporation à Welkom, État libre d'Orange	30
8. RÉUNION DANS LA RÉGION DE KLERKSDORP, LE 10 DÉCEMBRE 1985, À LA MINE STILFONTEIN EN VUE D'ÉTUDIER LE RÉSEAU MACROSISMIQUE DE LA CHAMBER OF MINES	32
9. RÉUNION À LA MINE WEST DRIEFONTEIN DU GOLDFIELDS GROUP, AFRIQUE DU SUD	40
BIBLIOGRAPHIE	44

Figures

		Page
Fig. 1 -	Système microsismique, Western Deep Levels Ltd.	4
Fig. 2 -	Accéléromètres piézoélectriques dans un montage triaxial	5
Fig. 3 -	Boîtier en acier inoxydable pour capteurs triaxiaux	5
Fig. 4 -	Système macrosismique à la Western Deep Levels Ltd.	10
Fig. 5 -	Système macrosismique à Blyvooricht	13
Fig. 6 -	Montage d'un géophone triaxial utilisé par la Chamber of Mines	21
Fig. 7 -	Seringue en plastique servant à appliquer la résine époxy dans le montage des géophones.....	21
Fig. 8 -	Seringue en plastique et montage d'un géophone triaxial préparé pour l'installation	21
Fig. 9 -	Montage d'un géophone triaxial utilisé par l'Anglo American Corporation. Capteurs fixés avec de l'époxy sur une barre usinée en laiton	31
Fig. 10 -	Composants d'une installation de géophones triaxiaux : outil d'alignement à section carrée, barre usinée en laiton pour retenir les géophones et un géophone (L'un des trois géophones utilisés est illustré.)	31
Fig. 11 -	Installations de mesure de surface pour un réseau d'observations microsismiques. Données transmises par radio. L'équipement électronique complexe est alimenté par l'énergie solaire. (Anglo American Corp.)	33
Fig. 12 -	Matériel microsismique : processeur de signaux analogiques, convertisseur analogique-numérique, microprocesseur, radio-émetteur et alimentation en électricité.....	34
Fig. 13 -	Système macrosismique de la Chamber of Mines installé dans la mine Stilfontein dans la région de Klerksdorp	37
Fig. 14 -	Station de radiotélémétrie faisant partie du réseau sismique de la mine West Driefontein	43

PRÉSENTATION DE SYSTÈMES SISMIQUES

UTILISÉS EN AFRIQUE DU SUD

PAR

W. Bawden et F. Kitzinger

1. Rencontre avec Dave Ortlepp de l'Anglo American Corporation, le 1er décembre 1985, à Johannesburg

M. Ortlepp présente une vue d'ensemble de l'exploitation de l'or en Afrique du Sud et énumère les principaux organismes et effectifs se consacrant à la mise au point et à l'exploitation de systèmes sismiques. L'Afrique du Sud compte trois principales zones d'exploitation de l'or : la première se situe près de Johannesburg, la deuxième est la région de Klerksdorp et la troisième comprend l'État libre d'Orange et la ville de Welkom. Les plus importantes sociétés d'extraction de l'or en Afrique du Sud sont les suivantes :

Rand Mines
Anglo American Corporation
Gencor
Anglo Transvaal Limited
Goldfields of South Africa Ltd.
Johannesburg Consolidated Investments (JCI)

En plus des sociétés minières, deux autres organismes d'Afrique du Sud réalisent des travaux de recherche microsismique sur les coups de toit; ce sont le Bernard Price Institute for Geophysical Research (BPI) et la Chamber of Mines d'Afrique du Sud. Le Bernard Price Institute dirigé par Rod Green, chercheur principal, est associé à l'université du Witswatersrand où sont d'ailleurs situés ses bureaux. La Chamber of Mines est un organisme de recherche générale financé par l'industrie minière de l'Afrique du Sud.

En Afrique du Sud, le secteur de l'exploitation minière compte quelque 500 000 employés; environ 400 000 d'entre eux travaillent dans des mines souterraines et la plupart sont des travailleurs noirs. Le taux de mortalité y est en moyenne d'environ 1 pour 1 000 travailleurs en mine souterraine par année. Environ 55 % des décès sont attribuables à des problèmes liés aux roches et la moitié d'entre eux aux coups de toit.

Une semaine avant notre arrivée, un coup de toit s'était produit à l'East Rand Proprietary Mines Ltd. près de Johannesburg. Ce coup de toit d'une magnitude de 3,5 Richter avait causé la mort de quelque 17 hommes. La zone touchée avait causé quelques surprises parmi les scientifiques sud-africains étant donné qu'ils n'avaient pas cru que cette zone pouvait être le site d'un événement d'une telle intensité. Dave Ortlepp prétend que l'Anglo American possède suffisamment de données indiquant que les travaux d'exploitation minière peuvent produire des contraintes suffisamment élevées pour créer des failles pouvant atteindre 2 000 mètres carrés. À l'échelle de l'industrie, la productivité des mines d'or est d'environ une tonne par poste de travail par jour.

2. Visite de la mine Western Deep Levels, propriété de l'Anglo American Corporation, le 3 décembre 1985, à Carletonville

Le département de mécanique des roches de la Western Deep Levels se subdivise en deux sections : une section de recherche et une section de services. La section de recherche en mécanique des roches oeuvre dans les trois domaines suivants :

- Recherche sur les coups de toit,
- Prédiction des coups de toit,
- Informatique.

Le groupe des services en mécanique des roches est dirigé par un chef régional, M. Dave Arnold. Chacun des trois puits est surveillé par un chef de section, appuyé d'un préposé à la mécanique des roches et de deux préposés au contrôle du toit. Les trois chefs de section relèvent de M. Arnold. La Western Deep Levels, comme toutes les mines d'or profondes, est exploitée

selon la méthode des longues tailles. Chacune des mini-tailles est divisée en trois panneaux d'environ 35 mètres. La productivité est d'environ 50 tonnes par panneau par jour. Le système sismique de la Western Deep Levels est composé d'un macrosystème ou un système utilisé à l'échelle de la mine et de 5 microsystèmes.

2.1 Description du système microsismique par Peter Mountfort, gestionnaire des services informatiques

À la mine Western Deep Levels (Fig. 1), cinq microsystèmes sont actuellement exploités. Chacun comporte un seul capteur triaxial couvrant une superficie de 200 mètres de rayon environ. Les systèmes microsismiques sont conçus pour enregistrer les événements de magnitude variant de -3,5 à 0 dans l'échelle de Richter et de fréquence variant de 500 Hz à 10 kHz. Les capteurs triaxiaux contiennent des accéléromètres piézoélectriques de marque BBN-507, avec amplificateurs de charge* intégrés. Le boîtier qui contient les trois accéléromètres des unités triaxiales a été conçu et construit par l'Anglo American (Fig. 2) qui a constaté dans le cadre d'observations souterraines que les unités triaxiales posent un problème de résonance à environ 5 kHz. Ces unités n'ont cependant pas été testées sur une table à secousses. On avait d'abord tenté d'installer les géophones triaxiaux dans le trou de sondage par ponçage avant de se rendre compte que le couplage était insuffisant. C'est pourquoi on a décidé de placer le capteur triaxial dans un tuyau d'acier (Fig. 3) que l'on a cimenté dans le trou de sondage. Le capteur BBN-507 a causé lui aussi une résonance à environ 20 kHz et une intensité de +3 décibels à environ 12 kHz.

---

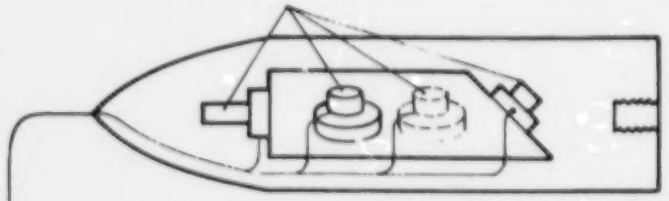
* BBN Instruments Corporation,
50 Moulton Street, Cambridge, MA. 02138 (É.-U.)

Figure 1

SYSTÈME MICROSISMIQUE, WESTERN DEEP LEVELS LIMITED

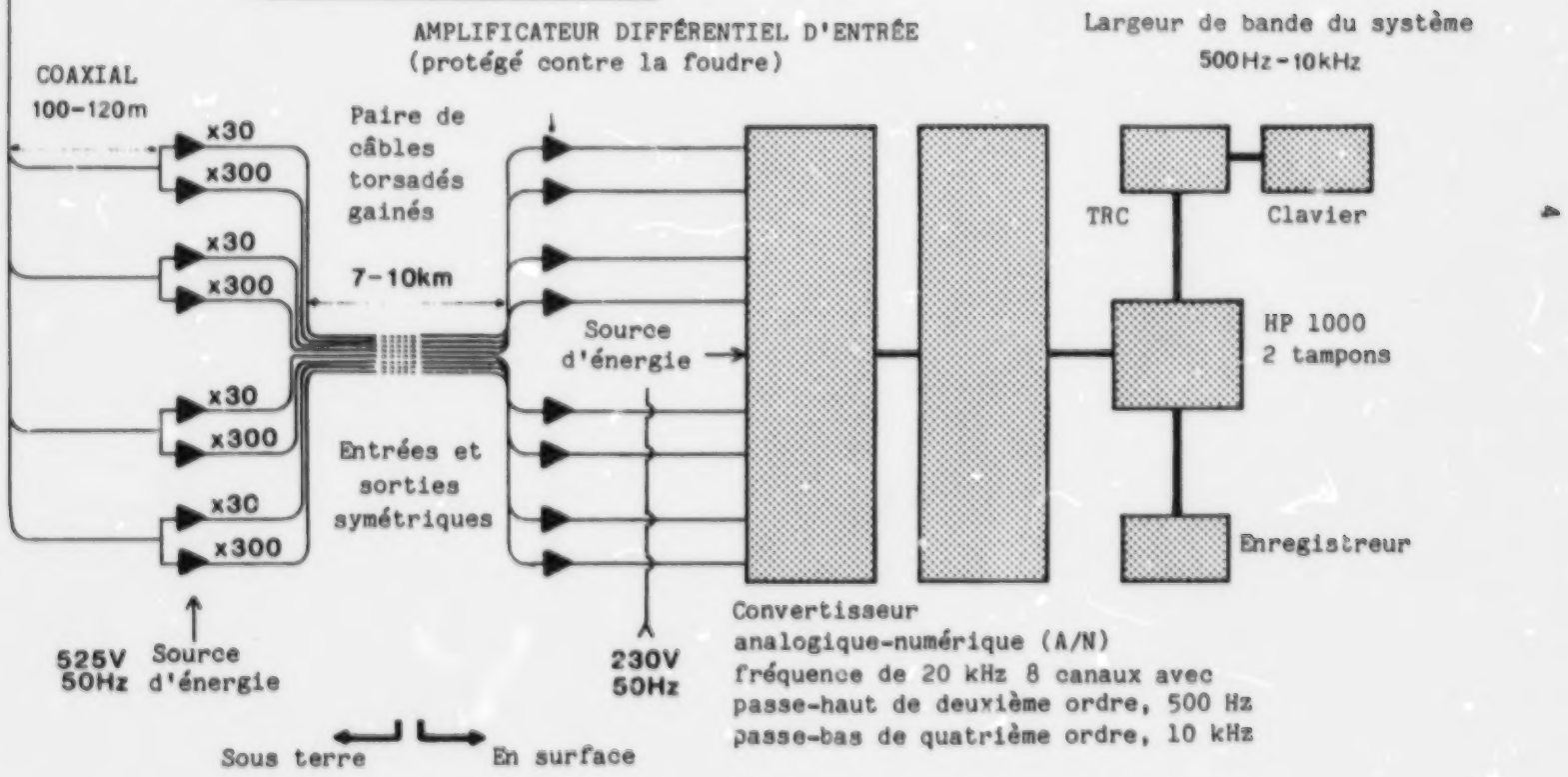
BBN 507 (x4)
avec amplificateur de charge intégré

(PETER MOUNTFORT,
GESTIONNAIRE DES SERVICES INFORMATIQUES)



AMPLIFICATEUR DIFFÉRENTIEL D'ENTRÉE
(protégé contre la foudre)

Largeur de bande du système
500Hz - 10kHz



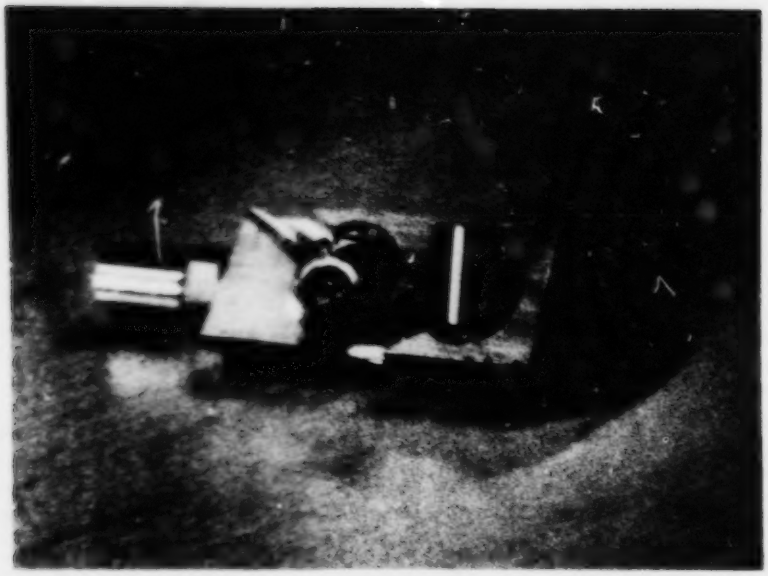


Figure 2. Accéléromètres piézoélectriques dans un montage triaxial.

Figure 3. Boîtier en acier inoxydable pour capteurs triaxiaux.

Les signaux de fréquence inférieure à 500 Hz sont rejetés par un filtre passe-haut de deuxième ordre. Pour éliminer tout bruit provenant de l'exploitation de la mine, le filtre anti-crénelage de quatrième ordre limite la hauteur du spectre à 10 kHz. Pour régler le problème de gamme dynamique, on utilise la transmission analogique, ainsi que deux amplificateurs pour chacun des deux axes, l'un donnant un gain de 30 fois, l'autre un gain de 300 fois permettant une différence de gain d'un facteur de 10. Le convertisseur analogique-numérique est utilisé pour déterminer si le canal à gain élevé est écrêté. Si c'est le cas, le signal provenant du canal à faible gain doit être accepté.

L'Anglo American indique qu'elle n'est pas en mesure d'obtenir une réponse de fréquence appropriée en utilisant le système d'amplification logarithmique. Les amplificateurs qui ont été acquis en Afrique du Sud sont placés à l'entrée du trou de sondage mais, ils pourraient, en fait, être situés à plus de 100 m de distance sans modification notable des signaux. Dans toute la mine, les câbles utilisés sont des paires torsadées gainées. Le bruit ne constitue pas un problème aux hautes fréquences et le bruit de basse fréquence est filtré lorsqu'il descend sous 500 Hz. L'alimentation en électricité (CA de 525 volts) est réalisée sous terre. Les capteurs sont cimentés dans les trous avec un coulis de ciment. Le capteur triaxial comporte un quatrième capteur situé à environ 57 degrés par rapport aux trois autres capteurs, lequel serait utilisé si l'un des capteurs orthogonaux cessait de fonctionner. Ce système a pour objectif de paramétrer les événements à partir des signaux perçus et d'enregistrer ces paramètres. Pour déterminer la vitesse, on intègre les traces des signaux. La somme des carrés de la vitesse est ensuite utilisée pour obtenir l'énergie. Pour localiser les événements, on sépare les ondes P et S. La direction est déterminée en polarisant les ondes P qui sont choisies au-delà d'un seuil arbitraire dont il sera question plus loin.

Après enregistrement du temps d'arrivée de l'onde P, il y a soustraction de l'onde P afin de permettre l'obtention d'une onde S pure. Une fois que la magnitude de l'onde S a été déterminée, on obtient le temps d'arrivée de l'onde S. Dans la mine Western Deep Levels, les vitesses ne sont pas bien calibrées. Dans certaines zones, elles peuvent parfois être corrélées avec

des éléments particuliers. Les capteurs sont, en général, placés à environ 200 mètres en avant du front. Le front se déplace alors vers le capteur. Lorsqu'il se trouve à environ 50 mètres du capteur, il est très difficile de différencier les temps d'arrivée des ondes P et S. Les signaux sont numérisés par l'ordinateur; ils sont corrigés et additionnés afin de déceler les événements. Cette fonction est accomplie par un comparateur numérique contenu dans le convertisseur analogique-numérique. Le signal est numérisé à la fréquence de 20 kHz.

On utilise deux tampons dans la mémoire de l'ordinateur pour traiter les données d'entrée. Une fois que l'événement a été déterminé, les paramètres sont calculés et emmagasinés. Les événements durent habituellement quelque 50 millisecondes. Le système microsismique de la Western Deep Levels n'enregistre donc que 50 millisecondes de données. La séparation des ondes P et S permet aux capteurs triaxiaux de surveiller efficacement un rayon d'environ 200 mètres. Au delà de 250 mètres, les signaux de haute fréquence sont éliminés par filtrage. Il faut en général de une à deux secondes pour que les paramètres nécessaires soient calculés.

Des seuils sont établis pour permettre de recevoir quelques centaines d'événements par heure. L'engorgement du système se produit après le dynamitage et après que les événements importants ont eu lieu, c'est-à-dire lorsque les secousses secondaires surchargent le système. La puissance spectrique est emmagasinée en utilisant 32 points. À l'origine, on faisait subir à l'onde P une transformée de Fourier de 64 points; mais on a, par la suite, fait subir à l'onde S une transformée de Fourier rapide de 32 points. Selon les porte-parole de la mine, cette façon de procéder fournit en général des résultats plus uniformes. Chaque capteur triaxial alimente son propre mini-ordinateur HP 1000. Un câble de paires torsadées protégé contre la foudre relie le capteur au convertisseur analogique-numérique et au HP 1000. À toutes les 15 minutes, une trace est entièrement transcrite sur disque aux fins de vérification du système.

L'enregistrement du temps d'arrivée de l'onde P est réalisé de la façon suivante : les données des trois canaux sont corrigées et additionnées afin de déterminer l'amplitude de l'onde P au-dessus du bruit de fond. On prélève

ensuite le point d'arrivée de l'onde P équivalant à environ 10 % de l'amplitude du signal d'entrée. Le rapport des amplitudes enregistrées par les trois capteurs est ensuite utilisé pour déterminer l'incidence de l'onde qui est calculée en fonction de l'azimut et de l'altitude, c'est-à-dire de deux angles, l'un dans le plan horizontal et l'autre dans le plan vertical.

On utilise une méthode semblable pour l'enregistrement des temps d'arrivée de l'onde S qui est souvent très courte. La méthode adoptée par la Western Deep Levels est de déterminer d'abord la crête de l'onde S et la plus grande surface. Le temps d'arrivée de l'onde S correspond aux premiers 10 % de cette amplitude d'onde. On semble en mesure à la Western Deep Levels de détecter une petite division de l'onde S mais son extraction automatique n'a pas encore été mise au point. Le bruit de forage passe très clairement : il est très semblable à un événement microsismique. Les très hautes fréquences sont relevées si le forage a lieu près du capteur triaxial. Les géophones du système microsismique sont installés dans des trous de sondage de 30 mètres de profondeur afin de les éloigner des fractures et d'éviter les réflexions causées par les zones déjà entièrement exploitées. Les données finales sont tracées dans le format suivant :

- Fréquence de coude en fonction du temps;
- Nombre d'événements en fonction du temps;
- Énergie moyenne logarithmique en fonction du temps; et enfin,
- Énergie logarithmique divisée par la fréquence de coude en fonction du temps.

La mine Western Deep Levels est en train de mettre sur pied une base de données empiriques et d'expérimenter des essais de prédiction des coups de toit en temps réel. Actuellement, elle tente de prédire les coups de toit qui risquent de se produire au cours des périodes de 8 heures commençant à 20 h et à 4 h.

La technique de prédiction consiste à utiliser le débit des événements et l'énergie moyenne des événements. Si le rythme des événements augmente rapidement sans diminuer après le dynamitage, il faut en conclure que le panneau commence à présenter des dangers. L'analyse des formes d'ondes sert à

relever les temps d'arrivée et obtenir ainsi une meilleure localisation des dangers. La plupart des événements se produisant à la Western Deep Levels sont plus ou moins liés à une structure géologique quelconque.

2.2 Description du réseau macrosismique ou du réseau exploité à l'échelle de la mine par Peter Mountfort, gestionnaire des services informatiques

Le système macrosismique comporte treize vélocimètres triaxiaux, répartis sur toute la surface de la mine et un indicateur d'énergie à un seul axe vertical, placé en surface (Fig. 4). Les vélocimètres utilisés sont des HS-J de Geospace*. La fréquence naturelle des vélocimètres souterrains est de 4,5 Hz et leur masse mouvementée est d'environ 5 grammes. Le géophone situé en surface résonne à la fréquence de 1 Hz. Trois unités HS-J de Geospace dont deux horizontales et une verticale sont montées ensemble, formant une unité triaxiale. Les capteurs des très basses fréquences ont posé certains problèmes. Ils sont très sensibles et cessent de fonctionner après un certain temps sans que l'on en connaisse la cause. Les capteurs de 4,5 Hz sont les plus sensibles. La fréquence la plus élevée des signaux habituellement captés par le système macrosismique est de quelques centaines de Hz. Les amplificateurs sont placés à l'entrée du sondage. Dans le système macrosismique, seuls les événements importants se produisant à une distance considérable sont relevés. Comme la partie haute fréquence du signal ne se propage pas au-delà de cette distance, il ne semble pas avantageux, financièrement parlant, d'utiliser des accéléromètres.

On a constaté qu'un événement de magnitude zéro a une fréquence de coude d'environ 120 Hz. Il n'y aurait donc aucune raison d'utiliser un accéléromètre dans le système macrosismique, sans compter que les accéléromètres sont

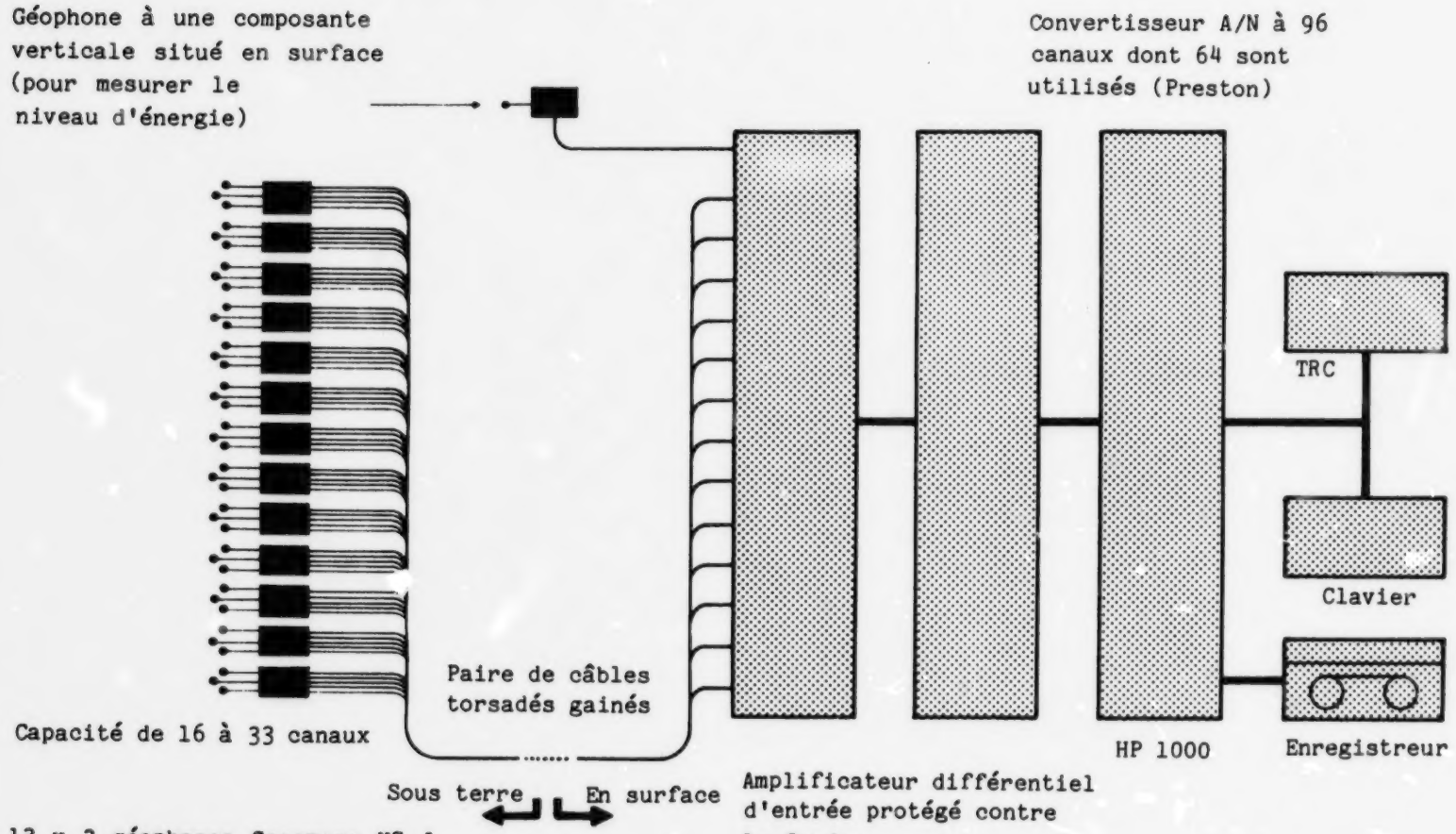
---

*AMF Geospace,
5803 Glenmont,
P.O. Box 36374,
Houston, Texas 77036 (États-Unis)

Figure 4.

SYSTÈME MACROSISMIQUE À LA WESTERN DEEP LEVELS LIMITED

(PETER MOUNTFORT, GESTIONNAIRE DES SERVICES INFORMATIQUES)



en général beaucoup plus chers que les vélocimètres. Cependant, les accéléromètres fourniraient un meilleur rapport signal-bruit que les vélocimètres pour les fréquences supérieures à 500 Hz.

Les signaux sont transmis à un seul ordinateur Hewlett Packard HP 1000 situé en surface. Le convertisseur analogique-numérique a une capacité de 96 canaux et réalise l'échantillonnage à 1 kHz. Les signaux provenant de tous les canaux sont enregistrés et les temps d'arrivée sont relevés manuellement. Il semble que dans le système macrosismique, le bruit ou les interférences sont très élevés et que les données ne sont pas d'aussi bonne qualité que dans le système microsismique. On a observé une résonance considérable dans les capteurs, sans pouvoir l'expliquer. De plus, il n'est pas rare que l'un des capteurs du géophone triaxial cesse de fonctionner, une fois encore, sans que l'on en connaisse la raison.

Les données sont stockées sur un tampon à disque dur qui peut contenir jusqu'à 90 événements correspondant aux données recueillies au cours d'une journée environ. Deux ou trois fois par jour, ces données sont extraites de l'ordinateur et tous les événements sont localisés. Environ 30 événements par jour de magnitude supérieure à zéro sont observés. Le reste des signaux enregistrés résultent d'explosions. La magnitude la plus basse localisée ou enregistrée à l'échelle de la mine varie d'environ -0,8 à 0 dans l'échelle de Richter.

M. Mountfort indique que le système macrosismique ne fournit pas suffisamment de précision sur la localisation des foyers pour qu'il soit possible de prédire les coups de toit. Même au centre du système macrosismique, où les capteurs sont plus nombreux, il n'est pas possible d'obtenir une localisation plus précise que 40 à 50 mètres dans le plan horizontal. À la limite du réseau sismique, on n'a aucune idée de l'exactitude obtenue. Certaines localisations ont pu être faites à 300-400 mètres du filon tabulaire situé à la limite du réseau. Au centre du réseau, l'espacement des géophones est d'environ 1 km et l'exactitude de la localisation dans le plan horizontal est de plus ou moins 40 ou 50 mètres.

Un modèle amélioré de la vitesse pourrait aider à accroître l'exactitude des localisations. Le système actuel comporte une incertitude d'environ 10 millisecondes en ce qui concerne l'enregistrement du signal d'arrivée, ce qui se traduit par une erreur de localisation de 60 mètres. Le câble du système macrosismique, y compris le câble du puits, est complètement gainé de feuille d'aluminium. Aux basses fréquences, en particulier au niveau de 50 Hz, des problèmes de bruit se posent. M. Mountfort a indiqué que certaines sociétés utilisent la conversion analogique-numérique avec changement d'échelle automatique plutôt que l'amplification logarithmique. Les mines de l'État libre d'Orange et le BPI prévoient recourir au changement d'échelle automatique en utilisant une technologie à 12 bits.

3. Visite auprès de Steve Spottiswoode de la mine Blyvooricht, Division de la Rand Mines Limited, le 3 décembre 1985 (Carletonville)

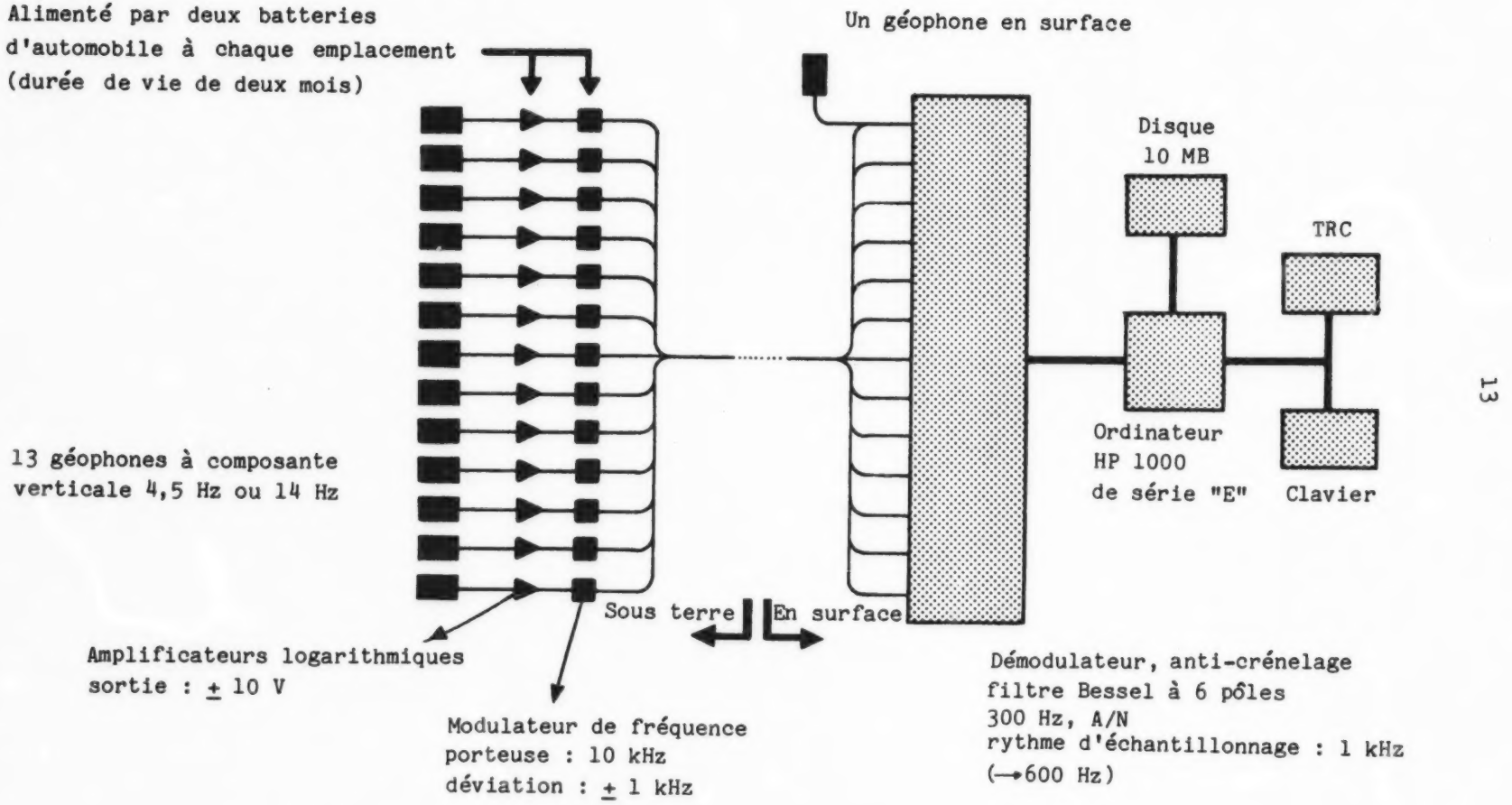
À cette mine, on utilise un système macrosismique (Fig. 5). La mine s'étend sur quelque 5 km; les capteurs sont espacés d'au moins 700 mètres; le câblage utilisé est une paire torsadée. Le système comporte treize vélocimètres à simple axe SM-6B ou SM-6/9 B de Geosource fabriqués en Hollande*. La fréquence naturelle des vélocimètres est soit de 4,5 Hz, soit de 14 Hz. Les vélocimètres de 4,5 Hz enregistrent des signaux de fréquence allant jusqu'à 500 Hz (environ). L'enregistrement des événements de magnitude supérieure à 1,5 serait de 100 %. Les vélocimètres utilisés sont tous de type vertical et ont une marge maximale de mouvement de 4 mm. Les capteurs ont une masse mouvementée de 11 grammes. Les amplificateurs logarithmiques utilisés ont été conçus et fabriqués par M. R. Green du BPI. La plage de fonctionnement s'étend de 10 microvolts à 10 volts. S. Spottiswoode indique que la dérive thermique de l'ordre des microvolts a soulevé certains problèmes en ce qui concerne les amplificateurs logarithmiques. C'est pourquoi M. Green est en train de fabriquer un amplificateur bilinéaire dans lequel des filtres passe-bas à 300 Hz sont utilisés. Les signaux subissent une modulation de fréquence

---

*Geosource - Sensor Netherland,
Rouwkooplaan 8,
2251 AP Voorschoten, Hollande

Figure 5. **SYSTÈME MACROSISMIQUE À BLYVOORICHT**

(STEVE SPOTTISWOODE)



et sont transmis par câble à paire torsadée. La distance maximale de la transmission des signaux est de 12 km. Leur sortie du système s'effectue selon un RMS d'environ un volt et leur enregistrement à environ 1/4 volt au niveau du démodulateur. La fréquence porteuse est de 2,5 kHz et la modulation de $\pm$1 kHz.

L'amplificateur logarithmique est situé à l'entrée du trou de sondage. Les géophones sont placés dans des trous de sondage horizontaux de trois mètres de profondeur. Les géophones sont d'abord montés dans un tuyau de plastique, perpendiculairement au tuyau. Le système est ensuite mis au niveau et cimenté à l'intérieur du trou de sondage.

L'exactitude du positionnement des capteurs varie, semble-t-il, de plus ou moins 20 mètres au centre du réseau, à environ 100 mètres en bordure. Selon M. Spottiswoode, aux fréquences d'enregistrement utilisées par un système macrosismique, il n'est pas nécessaire d'utiliser un accéléromètre. De plus, pour obtenir des données sur le déplacement, les vélocimètres donnent de meilleurs résultats que les accéléromètres, étant donné que les signaux ne doivent être intégrés qu'une seule fois. Enfin, aux gammes de fréquences prévues, les vélocimètres devraient être plus sensibles. Cette question est traitée dans un document présenté par R. Green[1].

Les préamplificateurs sont alimentés par deux batteries d'automobile de 12 volts. Elles durent environ deux mois et sont remplacées tour à tour. Spottiswoode souligne que cette façon de procéder se traduit par une diminution du bruit provenant de la mine. L'éloignement volontaire de certains sites par rapport à la source d'énergie vise à minimiser l'interférence induite.

Les signaux sismiques passent par un filtre d'anti-crénelage de 300 Hz et un convertisseur analogique-numérique de 12 bits. Les données sont ensuite consultables au moyen d'un mini-ordinateur dédié HP. Les événements sont enregistrés sur disque. L'enregistrement des événements est réalisé en utilisant des niveaux d'amplitude et des battements de 32 millisecondes. Les

canaux sont échantillonnés à 1 kHz; l'un des 32 canaux est une horloge codée. Pour avoir accès aux événements, on utilise un deuxième mini-ordinateur Hewlett Packard.

Les données peuvent être affichées sur l'écran et les temps d'arrivée des ondes P et S sont relevés manuellement. Les données importantes sont ensuite transcrites dans l'en-tête du sismogramme. Les 16 premiers mots sont utilisés à cette fin. Les sismogrammes sont conservés dans un fichier permanent. On utilise pour ce faire deux unités de disque de 5 méga-octets, chacune pouvant contenir environ 100 événements dont les plus intéressants sont conservés sur une bande permanente.

Spottiswoode a indiqué qu'un réseau sismique gouvernemental doit permettre un recouvrement complet de l'échelle des magnitudes. Il a déclaré que le signal était utilisé pour obtenir une meilleure précision des points d'arrivée des ondes P et S. Il a mentionné que compte tenu de la dérive initiale, résultant de l'utilisation d'amplificateurs logarithmiques dans le système de la mine, le mouvement des particules ne pouvait pas être déterminé avec précision et la transformée de Fourier rapide ne pouvait pas être appliquée au signal. La plupart des analyses se fondaient simplement sur la localisation des événements. Selon Spottiswoode, il nous faudrait engager un sismologue pendant environ deux ans pour qu'il puisse mettre au point l'enregistrement automatique de l'arrivée des ondes P et S. À la mine Blyvooricht, la première étape matinale consiste à noter manuellement les événements. C'est le personnel de secrétariat, formé à cette fin, qui réalise sans difficulté importante cette tâche pendant une durée d'une à deux heures. Dans un nouveau système, Spottiswoode recommande l'utilisation de la dynamique maximale.

4. Deuxième rencontre avec Steve Spottiswoode au bureau principal de la Rand Mines, le 5 décembre 1985 à Johannesburg

Les premières discussions ont porté sur le prélèvement automatique des temps d'arrivée des ondes P et S. Spottiswoode a indiqué qu'il faisait l'essai d'une fonction caractéristique et il nous a transmis un exposé de l'algorithme de prélèvement automatique qu'il utilise[2]. Il nous a ensuite proposé

d'analyser un exposé portant sur ARMS et présenté à la Conférence sur les coups de toit et la sismicité dans les mines[3]. Il nous a, de plus, donné un document intitulé "Underground Seismic Networks and Safety" publié en août 1984[4].

Spottiswoode a signalé qu'à ce jour, on n'utilisait en Afrique du Sud que des modèles à vitesse constante, sauf peut-être dans la région de Welkom. Spottiswoode a une fois de plus indiqué que l'exactitude typique au centre d'un réseau macrosismique serait d'environ 20 mètres. C'est à cet endroit qu'il y aurait 5 géophones situés dans un rayon de moins de 1 000 mètres. Selon Spottiswoode, pour concevoir un système fiable, il faut que la limite de haute fréquence soit maintenue d'un facteur de 4 au-dessus de la fréquence de coude. De même, les basses fréquences devraient être maintenues d'un facteur de 4 sous la plus basse fréquence. Aux magnitudes de 0 à 2,5, on peut calculer la largeur de bande nécessaire en utilisant l'équation 5 du document de Spottiswoode[4] qui est la suivante :

$$\text{Log } f = 2,3 - 0,5\ m$$

où f = fréquence
et m = magnitude

Dans ce cas, la fréquence maximale est d'environ 800 Hz et la fréquence minimale d'environ 5 Hz. En ce qui a trait au capteur idéal à utiliser, Spottiswoode mentionne qu'actuellement les ondes en question sont des ondes de volume lointaines. En outre, il serait avantageux d'examiner les ondes peu éloignées pour lesquelles il faudrait utiliser un instrument d'enregistrement de forts mouvements. Il a également indiqué qu'il serait avantageux de se pencher sur d'autres phénomènes, en particulier sur les ondes électromagnétiques. Dans le quartzite, il faudrait s'attendre à la production d'ondes électromagnétiques et à une forte diminution des ondes ou fréquences supérieures à 1 MHz. L'énergie électromagnétique produite pourrait être attribuable aux effets piézoélectriques ou à la formation de cristaux maclés de quartz.

En ce qui concerne le choix des événements, Spottiswoode indique qu'il avait tenté de relever tous les événements coïncidant dans le temps de sorte qu'il a pu établir que si deux capteurs sur cinq demeurent en position élevée, on peut en conclure qu'il s'agit d'un événement pertinent. Selon Spottiswoode, le progrès accompli dans l'analyse des coups de toit est davantage attribuable à une analyse plus poussée des données qu'à l'utilisation d'instruments plus perfectionnés.

5. Rencontre avec R. Green du Bernard Price Institute for Geophysical Research, le 5 décembre 1985, à Johannesburg

Le système macrosismique de la Goldfields a été conçu et fabriqué par Rod Green. Dans ce système, la compression des données logarithmiques est réalisée sous terre (amplificateurs logarithmiques) permettant une gamme dynamique d'environ 100 décibels. Après conversion logarithmique, les signaux sont acheminés par un système de transmission à modulation de fréquence afin d'éliminer le problème typique de bruit de ligne à 50 Hz. En surface, le signal est démodulé et numérisé par un convertisseur analogique-numérique 16 bits. Les signaux des diverses mines qui seront traités à la mine West Driefontein sont transmis par radiotélémétrie. Six mines sont surveillées par le système macrosismique. Les signaux des événements sismiques éloignés sont transmis par radiotélémétrie aux sites de la mine. L'ensemble des données des sismogrammes sont ainsi recueillies.

L'événement est enregistré par un déclencheur qui fonctionne en fonction de l'ouverture du réseau microsismique (c'est-à-dire le temps d'enregistrement entre les différents géophones) et la durée du signal. Si quatre déclencheurs sont atteints, il s'agit d'un événement. Le système comprend quelques capteurs triaxiaux, mais la plupart des capteurs sont des vélocimètres à composante unique. Green indique qu'il n'est pas impossible à l'avenir qu'on analyse la possibilité d'utiliser un petit réseau (c'est-à-dire un réseau microsismique comme celui utilisé à la mine Western Deep Levels) combiné à un réseau macrosismique. Il faudrait alors recourir pour le déclenchement à des critères d'ouverture et de durée différents. Tout cela peut être accompli informatiquement.

À l'origine, on avait placé des microprocesseurs 16 bits pour chacune des tours d'extraction. Ces microprocesseurs étaient utilisés pour surveiller les 32 canaux de ce puits particulier. Les microprocesseurs 16 bits transmettent ensuite ces données à un processeur 32 bits situé au laboratoire de traitement central à West Driefontein. L'utilisation de microprocesseurs 16 bits a causé un grand nombre de problèmes : notamment l'incapacité du logiciel de traiter la grande quantité de données recueillies. Selon Green, il aurait été possible d'accomplir davantage avec un matériel plus puissant. Il indique que l'industrie ne désire des données que sur l'emplacement et sur l'énergie produite, et que l'utilisation de matériel à cette fin aurait suffi. Tout le reste ne sert que dans le domaine de la recherche.

Green poursuit la mise au point d'un système numérique avec des étudiants de l'université du Witwatersrand. Ce système souterrain fonctionnera en fonction de huit canaux et comportera une mise à l'échelle du gain. Green ajoute qu'il n'est pas nécessaire que la précision des données sismiques soit celle fournie par un microprocesseur 16 bits; la prévision devrait plutôt se situer au niveau d'une dynamique étendue dont l'amplitude atteindrait une exactitude d'environ 1 %. Dans ce système qui est actuellement à l'étape de la mise au point, les étapes de gain sont de 30 décibels avec une conversion de 8 bits ainsi que 2 bits pour les données sur le gain. Green prévoit de relier ce système à un microprocesseur 68 000 avec transmission des données par fibres optiques. Il prévoit en outre d'utiliser une transmission des données à des débits atteignant les méga-octets. Il met actuellement au point le nouveau système de façon à ce qu'il puisse d'abord fonctionner parallèlement à un réseau existant.

Green prévoit de transférer les signaux dans un microordinateur PC XT. Il a mis au point le logiciel d'acquisition des données. Le système peut sous sa forme actuelle être utilisé comme un système d'acquisition de données numériques de précision. La prochaine étape consistera à le brancher au IBM PC situé sur le site de la mine à Carletonville et à réaliser le traitement à la mine même.

Green signale que le BPI a réalisé des progrès considérables en matière de logiciel pour le nouveau système. À ce jour, on a réalisé la mise au point de l'enregistrement automatique des temps d'arrivée des ondes P et S et des transformées de Fourier rapides. Dans l'avenir, on prévoit d'être en mesure de déterminer le moment sismique, la diminution soudaine des contraintes, etc.

En ce qui concerne l'amplificateur logarithmique qu'il a conçu et mis au point, Rod Green souligne que cette technologie nécessite un montage très précis et qu'elle constitue un instrument de recherche. Selon Green, le problème auquel a dû faire face Spottiswoode est en partie attribuable au fait que le système fonctionne à partir de batteries et qu'avant d'être remplacées celles-ci se déchargent à un point tel que les déformations thermiques qui en résultent endommagent le système. Green indique que les amplificateurs logarithmiques utilisés ne conviennent pas à cause de l'étroitesse de la largeur de bande. Green est en train de mettre au point des accéléromètres et des géophones dont la dimension permettra leur insertion dans des trous de sondage. Ses travaux portent également sur la mise au point d'un géophone de 1 Hz dont la masse mouvementée sera de 1 kg.

6. Visite aux laboratoires de recherche de la Chamber of Mines, le 6 décembre 1985, à Johannesburg

6.1 Rencontre avec Nick Gay

D'après M. Gay, un réseau important couvrant quelque 500 kilomètres carrés était géré par la commission géologique; ce réseau couvrait un grand nombre de mines. En outre, beaucoup de sociétés minières comme l'Anglo American, la Gencor et la Rand Mines gèrent des réseaux régionaux. Le réseau national utilise des capteurs Geotech Teledyne de 1 à 4 Hz et les réseaux régionaux utilisent des vélocimètres de 4,5 à 14 Hz. La région de Klerksdorp est couverte par le réseau de la Chamber of Mines. La région de Carletonville possède son propre réseau et l'East Rand Proprietary Mines (ERPM) est aussi en train d'installer son propre réseau. En plus de ces réseaux régionaux ou à l'échelle de la mine, les sociétés envisagent aussi des réseaux serrés de

l'ordre de 400 à 500 mètres. Ces réseaux serrés compteraient entre 16 et 20 géophones triaxiaux installés suivant un dispositif tridimensionnel. Les sociétés minières s'intéressent aux causes du déclenchement des manifestations sismiques dans des régions de géologie complexe et sont en train d'installer un tel système dans les mines de Vaal Reef. Elles étudient la géologie complexe d'une région comprenant des dykes et des failles et qu'on soupçonne d'être encore active. Le système original n'était qu'un système de comptage. Les systèmes sont décrits dans une étude de Johann Scheepers publiée dans le "Seismicity in Mines Bulletin"(5). À partir de ces systèmes originaux de comptage, les sociétés ont décidé d'aller de l'avant et de construire un système plus perfectionné que celui qu'elles sont en train d'installer. Elles prévoient installer un tel système microsismique à la mine de West Driefontein dans les Goldfields. Ce système sera un réseau secondaire de 400 à 500 mètres qu'on installera pour étudier un secteur résiduel triangulaire qui doit être exploité. Le système prévu sera exploité au sein du système à l'échelle de la mine West Driefontein et servira à étudier les effets de la structure géologique et du remblai.

6.2 Discussions avec Ken Patrick, ingénieur électricien

Ken semble être un des chefs concepteurs-projecteurs du système pour la Chamber of Mines. Il a mentionné que cette dernière se sert de vélocimètres modèle Sensor SM-6B. Les géophones sont installés dans une tige d'acier où l'on perce trois trous perpendiculaires les uns aux autres; les géophones sont fixés avec de l'époxy dans ces trous (Figure 6). L'assemblage complet est alors fixé avec de l'époxy dans un trou de sonde de taille BX (Figures 7, 8). Selon Ken, la résonance était un problème pour les capteurs triaxiaux. On a effectué des essais sur la table à secousses et on a rencontré des difficultés dans les plus basses fréquences lorsque les déplacements étaient rapides, mais on n'a pas trouvé de solutions au problème de résonance pour les capteurs triaxiaux. Un interrupteur basculant à mercure, simple, peut être utilisé pour mettre en place l'indicateur triaxial.

On utilise des accéléromètres pour des études microsismiques, par exemple à la mine Western Deep Levels. Ces accéléromètres sont aussi utiles si l'on

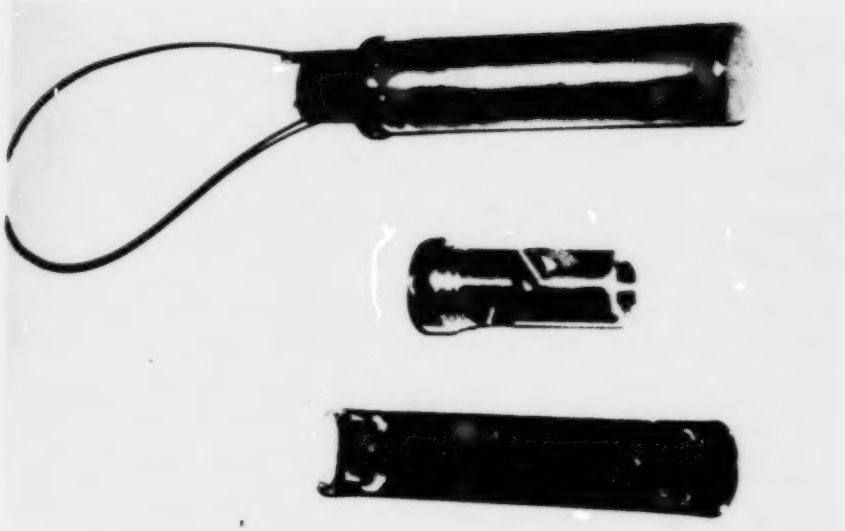


Figure 6. Montage d'un géophone triaxial utilisé par la Chamber of Mines.

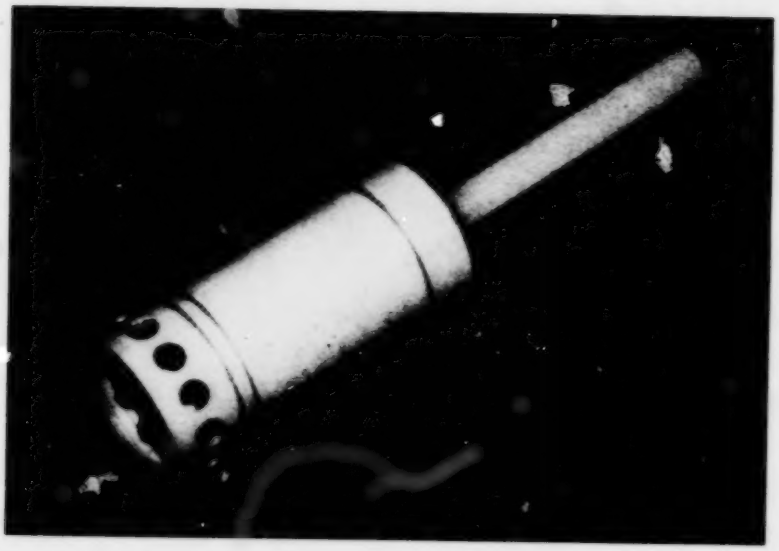


Figure 7. Seringue en plastique servant à appliquer la résine époxy dans le montage des géophones.

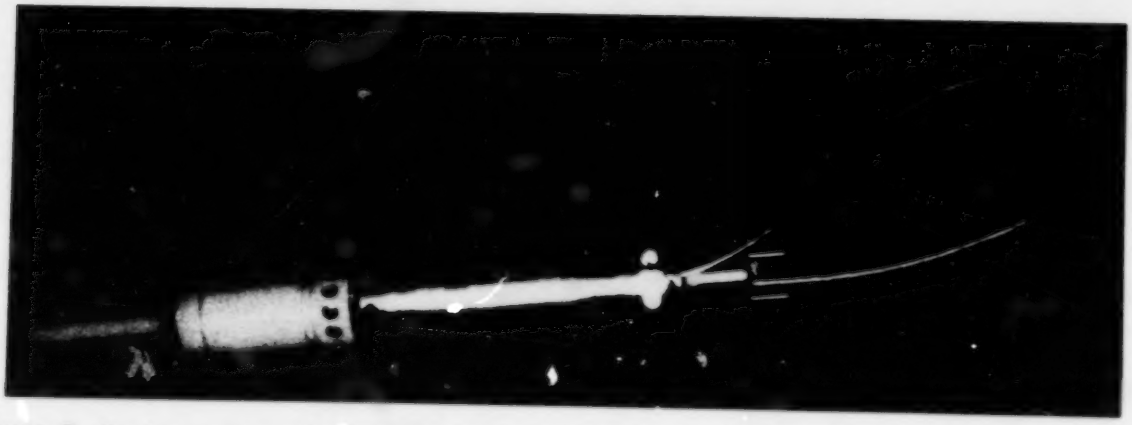


Figure 8. Seringue en plastique et montage d'un géophone triaxial préparé pour l'installation.

veut étudier la vitesse maximale car ils possèdent une gamme dynamique plus élevée. On peut intégrer les signaux pour obtenir les vitesses. La Chamber a eu du succès une fois dans la mesure des vitesses des particules (entre 0,2 et 1,1 mètre par seconde), à quelque 50 mètres de la source. Les indicateurs de vitesse ne sont généralement bons que pour des vitesses maximales ne dépassant pas 0,9 mètre par seconde environ. La vitesse maximale des particules est utile dans l'étude des dégâts causés par les coups de toit. Art McGarr a fait une étude sur ce sujet, qui a été publiée dans le "Seismicity in Mines Book"(6). Les accéléromètres utilisés sont du modèle BBN-507, sont fondés sur le principe des capteurs piézoélectriques et coûtent environ 2000 rands. La Chamber of Mines envisage la construction de ses propres accéléromètres dont la gamme de fréquences varie entre 2 Hz et 2 kHz, cependant on rencontre des difficultés avec l'étalonnage de ces unités.

6.3 Rencontre avec Johanne Churcher

Johanne s'occupe du programme de la sismicité de la Chamber. Avec ses systèmes en place, la Chamber reçoit tous les jours une bande magnétique sur les manifestations qui est traitée pendant la nuit. Les données stockées sur disque comprennent les emplacements des foyers et le sismogramme complet. Le système souterrain possède un dispositif de saisie automatique des ondes P et pourrait aussi servir à localiser les foyers souterrains. Johanne travaille actuellement sur un algorithme de saisie des ondes P. Pour des systèmes microsismiques, la Chamber of Mines a besoin d'un algorithme très rapide car elle s'attend à avoir environ 1 000 manifestations sismiques par jour. Des systèmes plus grands, à l'échelle régionale, ont plus de temps (c'est-à-dire ils enregistrent moins de manifestations), et peuvent par conséquent utiliser des algorithmes plus complexes pour la localisation des foyers. L'algorithme actuel permet de calculer un niveau de bruit et à partir de ce niveau il permet d'établir un seuil; il prend ensuite environ une fois et demie le niveau de bruit auquel il ajoute un décalage. Il cherche un échantillon qui dépasse ce seuil et appelle cet échantillon le temps d'arrivée. L'algorithme est toutefois sensible aux pointes d'impulsion. Dans le cas de plus grandes manifestations, les temps d'arrivée seront saisis une nouvelle fois par un opérateur. Avec le système actuel, on a tendance à voir des erreurs constantes

dans le choix du temps d'arrivée des ondes P, en outre, on a tendance à saisir ces temps d'arrivée uniformément tôt. Lorsqu'on utilise des stations uni-axiales, il est parfois difficile de différencier les arrivées des ondes P des arrivées des ondes S. Le logiciel est mis au point autour de la base de données fondamentale de la Chamber of Mines. Comme il a déjà été dit, le traitement se fait pendant la nuit et les données de base sont stockées sur disque. Les analyses effectuées comprennent la magnitude des manifestations; les emplacements sont reportés sur des plans miniers sur lesquels on reporte la géologie; la légende géologique est reportée sur des graphiques colorés. On calcule l'énergie et on enregistre les relations entre la fréquence et la magnitude pour tout le sismogramme. Ce dernier nous permet, à l'aide des transformées de Fourier rapides du spectre, de calculer la fréquence de coude, la baisse de la contrainte et le moment sismique. On a aussi effectué les analyses des premiers mouvements. Dans l'algorithme de saisie des temps d'arrivée, la Chamber of Mines prévoit la comparaison des temps d'arrivée et l'utilisation d'un système de détection des valeurs aberrantes. Toute valeur aberrante sera rejetée. L'algorithme fondamental a été établi par Salamon et Wiebols[7]. Il prend moins d'une seconde pour calculer la localisation; avec la détection des valeurs aberrantes cela peut[8] prendre une minute. Une étude publiée dans le "Seismicity in Mines Book" traite d'une comparaison des algorithmes concernant la localisation des foyers. Toute la programmation se fait à l'aide du langage Basic de Hewlett Packard. La Chamber utilise un HP-9920, ordinateur 32 bits, qui possède une mémoire vive de 3/4 d'un méga-octet. Un disque de 65 méga-octets fait aussi partie du système.

6.4 Rencontre avec Nigel Legge

La Chamber of Mines se sert de réseaux microsismiques pour détecter la formation des fractures situées en avant du front de taille. Elle étudie plus particulièrement les manifestations dont les magnitudes se trouvent entre -2 et -5 dans l'échelle de Richter. On mesure en réalité un type d'émission acoustique. La Chamber voudrait savoir à quelle distance du front de taille les fractures commencent à se former et quelle orientation elles prennent. Il est difficile d'avoir une localisation exacte des foyers dans cette région.

La saisie automatique des temps d'arrivée est nécessaire et la Chamber of Mines a l'intention d'abandonner l'onde sismique après la localisation du foyer. L'équipement est presque le même que celui décrit antérieurement dans la section 2.1, mais le logiciel est différent. On n'enregistre que le temps d'arrivée et l'énergie des manifestations. Les ondes peuvent être enregistrées si nécessaire. On prévoit l'enregistrement d'une onde par jour pour l'étalonnage. On utilise des accéléromètres, du modèle BBN-507HS, dans le mode uniaxial. La Chamber prévoit le noyage du capteur dans une nacelle de résine qui sera alors placée derrière une seringue remplie de sulfite et insérée dans le trou. La seringue peut alors être retirée et la nacelle poussée dans le sulfite. Après la prise de la résine, on dévisse et on retire les tiges d'installation. Ces montages peuvent être installés dans des trous de 35 mètres.

La Chamber of Mines n'a pas l'intention d'utiliser de modulation de fréquence, mais elle transmettra plutôt la bande de base de modulation, sur une courte distance, au processeur. La largeur de bande du système est de 10 kHz et le signal sera échantillonné à 30 kHz. Au début la Chamber of Mines s'attendait à voir 1 000 manifestations par jour environ, mais elle s'est aperçue que le nombre des manifestations variait réellement entre 200 et 2 000 par jour. Les temps d'arrivée sont saisis dans le sous-sol. On intègre le signal pour obtenir la vitesse et on se sert de la somme des carrés pour calculer l'énergie. Cette dernière, enregistrée numériquement sur une bande magnétique, est ramenée à la surface pour la localisation du foyer. Les ondes saisies sont aussi enregistrées numériquement sur une bande magnétique. Avec les accéléromètres utilisés, les plus basses fréquences du spectre tombent rapidement au-dessous de 200 kHz environ, par conséquent, les unités ne sont pas bonnes pour les études de déplacement. On a utilisé l'enveloppe du signal pour le déclenchement. C'est ainsi que la Chamber a pu localiser presque 65 % de toutes les manifestations et 75 % des manifestations enregistrées par plus de 4 géophones.

M. Legge est ingénieur en mécanique des roches, il étudie les fractures des roches et la formation des fractures provoquées par une mine stable en avant du front de taille. L'exploitation minière de l'or en Afrique du Sud est une

opération très importante. La Chamber of Mines souhaite obtenir des renseignements sur le mécanisme de la formation des fractures et utiliser ces renseignements pour la conception des chantiers d'abattage dans le but de réduire au maximum les dangers pour les employés. Pour cela, elle fait appel à la microsismique. La Chamber of Mines a constaté qu'il existe deux types fondamentaux de coups de toit; les coups de toit provoqués par des déplacements des structures existantes comme des failles ou des dykes et les coups de toit associés aux fractures instables autour des fronts de taille des chantiers d'abattage qui progressent. Elle a recommandé l'installation de capteurs dans un terrain relativement libre de contraintes. En microsismique, on pourrait s'attendre que les fréquences de coude soient d'environ 2 kHz, fréquence qui est associée à un foyer de quelques centimètres. On soupçonne que les manifestations enregistrées proviennent d'un certain nombre de manifestations séparées qui ont fini par fusionner pour donner des fractures importantes, par conséquent, des coups de toit de forte puissance.

6.5 Futures réalisations de la Chamber of Mines

La Chamber of Mines s'intéresse à la mise au point d'un réseau sismique portable. Les réseaux dont on se sert actuellement en Afrique du Sud ne sont pas portables, nécessitent un à deux ans pour être installés, doivent couvrir plusieurs niveaux et sont encombrants et coûteux. Les systèmes qui existent à l'échelle de la mine sont utiles pour déterminer des régions qui présentent un intérêt. La Chamber of Mines voudrait maintenant mettre au point un système portable pouvant servir à l'étude détaillée des "points chauds", mais elle se demande s'il faut le construire ou l'acheter. Nous les avons mis au courant des travaux de perfectionnement d'Instantel au Canada, cependant, il n'est pas certain qu'Instantel puisse répondre à temps aux besoins de la Chamber of Mines.

La Chamber a constaté que le système prévu en question a certaines caractéristiques. D'abord, les mines veulent un système transparent qui indique uniquement la localisation et l'énergie des manifestations, la Chamber veut, toutefois, plus tirer parti de ces données.

7. Réunion avec l'Anglo American Corporation à Welkom, le 9 décembre 1985

7.1 Réunion avec B. Davies et M. Dix

M. Dave Ortlepp de l'Anglo American Corporation nous a présenté les deux chefs de section des services de la mécanique des roches, MM. Bernie Davies et Maurice Dix. À Welkom, les groupes sont divisés en services de la mécanique des roches et en projets de la mécanique des roches. Les services de la mécanique des roches comptent environ 19 employés et 14 projets. Le personnel des services de la mécanique des roches est attaché à chacun des directeurs de la production. L'Anglo American possède environ 8 mines d'or dans la région de Welkom dont certaines sont actuellement en cours de rationalisation pour constituer une mine géante. Pour des besoins administratifs courants, ce type de mine a été divisée en deux sections, nord et sud, gérées respectivement par les deux chefs de section. Cette nouvelle mine géante s'appelle l'Orange Free State Consolidated Gold Mines Limited dont le nombre d'employés qui travaillent au fond s'élève à quelque 70 000 hommes; 50 000 sont des travailleurs noirs.

Les mines originales, qui ont été fusionnées pour former la nouvelle super mine, ont produit entre 200 000 tonnes et 250 000 tonnes par mois. Actuellement, les puits nouvellement foncés sont prévus pour une production de 250 000 tonnes par mois. R.L. de G. Solms nous a présenté une étude sur la construction des nouveaux puits[9]. On exploite actuellement des matériaux ayant des teneurs aussi faibles que 4 grammes par tonne, ce qui nécessite par conséquent des tonnages très élevés pour que l'exploitation soit rentable.

7.2 Manifestations sismiques tragiques dans la région de Welkom

En décembre 1976, il s'est produit une manifestation sismique, connue depuis comme le tremblement de terre de Welkom. Cette manifestation a dépassé la magnitude 5 dans l'échelle de Richter et a eu comme conséquence, environ deux heures plus tard, l'effondrement d'un immeuble d'appartements de six étages. On a eu le temps d'évacuer tout le monde avant l'effondrement. Il semble que cet immeuble ait été très mal construit car les autres immeubles avoisinants,

de même taille et de même type, n'avaient pas été dérangés par cette manifestation. Dans la mine souterraine, on a remarqué un déplacement de 23 cm le long de la faille.

En avril 1982, il s'est produit une manifestation sur l'une des failles longitudinales de direction nord-sud. Le mouvement a endommagé les puits n° 4 et n° 1 qui sont restés en panne pendant deux jours. Lorsque la manifestation a eu lieu, les puits n° 4 et n° 1 ont joué le rôle de voie de secours d'urgence pour les autres puits. Environ 10 000 hommes ont été bloqués dans la mine souterraine et ont été évacués par des voies anciennes de secours. Il n'y a eu que deux morts après cette manifestation sismique dont la magnitude était de 4,2 dans l'échelle de Richter. On a pu observer des déplacements dans la mine souterraine atteignant 40 cm.

Les structures géologiques de la région de Welkom sont traversées par une série de failles normales longitudinales orientées, plus ou moins nord-sud. Ces failles plus d'autres fractures transversales débitent les fronts de taille en blocs relativement courts. Cette configuration géologique rend pratiquement impossible la méthode classique d'exploitation par longue taille en profondeur. Souvent dans ces régions, on doit exécuter des travaux de préparation, ce qui mène souvent à l'abandon de piliers sur des chantiers d'exploitation. Les zones de fortes contraintes qui se trouvent au-dessous de ces piliers peuvent être à l'origine de problèmes importants. Ceci mène en outre à l'exploitation de certaines quantités de roche stérile. Dans certaines zones, on doit effectuer une exploitation très dispersée, laissant un grand nombre de piliers abandonnés. Les largeurs des chantiers d'abattage ont des valeurs nominales variant entre 1 mètre et 1,5 mètre. Dans les zones plus basses, les largeurs des chantiers d'abattage atteignent 2,5 mètres. Un second filon se trouve à quelque 20 mètres au-dessus de la zone principale actuelle d'exploitation. Ce filon a une puissance d'environ 2 mètres; il a une teneur beaucoup plus faible mais étant donné que des galeries de mise en valeur sont déjà en place il est probablement rentable. La teneur de coupure de ce filon serait de 3 grammes par tonne. Il existe sans aucun doute dans cette région minière le besoin de comprendre les décrochements en vue de prévoir les mouvements futurs. L'appareillage sismographique initialement installé dans la région de Welkom servait uniquement à la localisation des

manifestations et ressemblait beaucoup au système Electrolab actuel des États-Unis (10); actuellement, on est en train de l'améliorer. Le système original, quoiqu'il ne garde pas le sismogramme complet et, par conséquent, présente des difficultés pour déterminer les temps réels d'arrivée, permettait encore de délimiter des régions d'activité sismique anormale. D'après les chefs des sections de la mécanique des roches, nous devrions faire attention à ne pas considérer les localisations uniquement sous leur aspect bidimensionnel, car les coupes verticales ont aussi un rôle très important. Toujours d'après les mêmes personnes, la localisation des dégâts peut être très décevante du point de vue de la localisation du foyer. Les localisations des foyers dans la région de Welkom indiquent que l'activité sismique a tendance à se produire au mur. Les chefs des sections ne pensent pas que les localisations puissent être assez loin pour que l'indication ci-dessus ne présente pas de signification importante. Par contre, dans les niveaux profonds à l'ouest, la plus grande activité a lieu autour des chantiers d'abattage. Dans la région de Klerksdorp, l'activité sismique se manifeste surtout le long des principales structures géologiques. Il semble donc que les mécanismes sismiques diffèrent selon les différentes régions minières.

7.3 Rencontre avec Alexander Mendecki, sismologue, à l'Anglo American Corporation à Welkom, État libre d'Orange

M. Mendecki a souligné que, dans la sismologie des coups de toit, un bon système de géophones sismiques est nécessaire pour obtenir les localisations et déterminer les mouvements réels du sol. Si le nombre des stations est insuffisant dans une grande région, il est parfois difficile de localiser les mouvements avec une précision adéquate. Il a en plus mentionné que tout système sismographique a son propre "point aveugle". Le critère permettant de déterminer un tel point dépend du système et des vitesses sismiques. Selon Mendecki, il faudrait faire particulièrement attention aux coordonnées Z, (dans le plan vertical) et commencer d'abord par spécifier le nombre de géophones dans un emplacement donné. Onze géophones triaxiaux doivent être utilisés pour localiser des manifestations avec une précision supérieure à 1 %. Mendecki signale encore qu'il existe un nombre optimal de stations, c'est-à-dire que parfois un nombre inférieur à onze géophones triaxiaux peut donner de meilleurs résultats. Il suggère que si les caractéristiques de

propagation des mouvements dans le sol sont connues, sept ou huit géophones peuvent suffire, mais si ce n'est pas le cas il en faudra alors au moins onze. Il a en outre mentionné que l'étalonnage du système de géophones est extrêmement important et il a proposé qu'on procède d'abord à l'étalonnage puis qu'on établisse la vitesse optimale de propagation puisqu'on calcule l'erreur. Cette opération doit être répétée, avec plusieurs manifestations différentes, pour donner des résultats optimaux. Il a probablement suggéré un type d'analyse par tomographie sismique, bien qu'il n'ait pas mentionné ce terme.

D'après Mendecki, il est plus facile d'obtenir le mouvement vrai du sol avec des vélocimètres qu'avec des accéléromètres. Les premiers montrent aussi un meilleur rapport signal/bruit. Mendecki a continué à insister sur l'importance d'obtenir ce qu'on appelle un vrai mouvement du sol, et précisé que si nous nous intéressions aux magnitudes situées entre 0 et 2,5, nous devrions alors chercher une gamme de fréquences qui se situe entre 4,5 Hz et plusieurs centaines de hertz. Il a laissé supposer que les mines subissent des dommages entre les fréquences de 1 Hz et 100 Hz. Nous devrions donc adopter comme limite supérieure de la fréquence une valeur entre 200 et 300 Hz.

D'après Dave Ortlepp, il faudrait amener la magnitude de notre système au-delà de la limite de 2,5, jusqu'à une limite supérieure de 3,5. Mendecki a proposé d'établir une échelle des événements par rapport au moment sismique et non par rapport à la magnitude. Il a ajouté que pour que le système puisse aller au-delà de la magnitude 4, nous devrions abandonner les basses fréquences qui se trouvent au-dessous de 4,5 Hz. Il proposait dans ce cas d'introduire un seul sismomètre de 1 Hz. Voici l'équation qui donne la vitesse du mouvement des particules :

$$V = \log \frac{A}{T} + Q$$

Il a indiqué que le moment sismique est donné par l'amplitude aux très faibles fréquences. Afin de s'assurer qu'on a la partie horizontale du spectre de fréquences on doit, par conséquent, abandonner la limite de fréquence. Selon

Mendecki, les capteurs de Geospace sont suffisants. Les géophones de cette société ne sont presque jamais tombés en panne. Il a proposé que nous vérifiions les géophones sur une table à secousses au moment de leur réception, afin d'effectuer notre propre étalonnage et que nous les gardions aussi loin que possible de la source sismique. Il a encore répété que nous devons inclure dans notre programme au moins 1 sismomètre de 1 Hz comme unité de surface. Cette méthode nous permettrait de nous rattacher au réseau national en termes de magnitude.

7.4 Réunion avec Rob Dixon de l'Anglo American Corporation, à Welkom, État libre d'Orange

M. Dixon semble être l'homme-clef en électronique à cet endroit. Le nouveau système actuellement utilisé possède 31 géophones triaxiaux. Les trois capteurs de vitesse sont fixés avec de l'époxy à l'intérieur d'un support en laiton qui est à son tour fixé avec de l'époxy à l'intérieur d'un trou de sonde de 8 mètres (Figures 9, 10). Les signaux provenant des géophones sont doublement amplifiés d'un facteur de 1 et un facteur 1 000. Les signaux sont numérisés à l'entrée du trou de sonde et le logiciel permet de choisir le signal optimal. On utilise une conversion A/N à 12 bits, commandée par microprocesseur. Quatre tampons de 24 kilo-octets de long chacun sont alors utilisés selon un schéma cyclique jusqu'à l'apparition d'un événement sismique. Cette opération permet d'économiser quatre secondes de données pour chaque géophone. Un signal de temps est envoyé toutes les cinq minutes pour synchroniser le système. On prévoit cinq autres stations, relativement proches de la zone minière pour obtenir une localisation du foyer aussi précise que possible. Étant donné la disposition des mines, le système est installé de façon à couvrir la propriété de l'Anglo American et la propriété de la Gencor, bien que le système ne soit géré que par l'Anglo American. L'incertitude type pour les emplacements varie entre 20 mètres et 100 mètres. Cependant, l'Anglo American pense que l'algorithme actuel n'est pas aussi bon qu'il aurait dû l'être car il a été conçu il y a environ six ans. Cette société prévoit l'amélioration de ce système dans le futur. Le facteur-clef dans ce système est la numérisation des données dans le sous-sol à l'entrée du trou

Figure 9. Montage d'un géophone triaxial utilisé par l'Anglo American Corporation. Capteurs fixés avec de l'époxy sur une barre usinée en laiton.

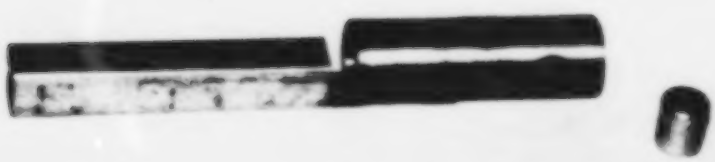


Figure 10. Composants d'une installation de géophones triaxiaux : outil d'alignement à section carrée, barre usinée en laiton pour retenir les géophones et un géophone. (L'un des trois géophones utilisés est illustré.)

de sonde. Les données numériques sont alors transmises sur un câble téléphonique simple composé de deux fils torsadés jusqu'à la surface puis transmises par radio jusqu'à un processeur central à partir de chaque puits.

MM. Paul Armstrong et Bernard Diab ont ensuite donné des détails sur le système. On a visité les installations de mesure de surface (Figure 11) où, à l'exception de la méthode d'alimentation en électricité, fournie en surface par l'énergie solaire, la disposition est exactement la même que dans les installations souterraines. Les installations de surface comprenaient un processeur de signaux analogiques, un tiroir de traitement, un processeur central basé sur une puce 6800 et des cartes de conversion A/N, une unité d'alimentation et un émetteur-récepteur (Figure 12). Le géophone lui-même se trouvait dans un bloc de béton de 2 mètres cubes à proximité de la surface.

8. Réunion dans la région de Klerksdorp, le 10 décembre 1985 à la mine Stilfontein en vue d'étudier le réseau macrosismique de la Chamber of Mines

La personne-clef de la Chamber of Mines du réseau était M. Johann Scheepers. La Gencor* d'Afrique du Sud détient et exploite la mine Stilfontein. L'ingénieur spécialiste de la mécanique des roches est M. Roger More O'Ferrall. M. Scheepers a présenté la majeure partie de la description du système. Dans la région de Klerksdorp, les manifestations sismiques les plus importantes ont des magnitudes qui varient entre 3 et 4 dans l'échelle de Richter. Ces manifestations sont généralement contrôlées par les structures et s'observent le long de failles ou de dykes. On a commencé la surveillance macrosismique en 1976 à l'aide de 5 ensembles de géophones triaxiaux dont les résultats ont été rectifiés et sommés en vue de rendre la détection omnidirectionnelle. En 1976, un technicien à plein temps était chargé du système et le nombre de géophones est passé plus tard à 28; la superficie surveillée a aussi été augmentée. Le système, comme il existe actuellement, comprend 28 géophones, dont 10 ou 11 sont peu profonds et le reste est situé à de grandes profondeurs où à des profondeurs intermédiaires. Six géophones sont installés en surface,

*General Mining Union Corp. Ltd.

Figure 11. Installations de mesure de surface pour un réseau d'observations microsismiques. Données transmises par radio. L'équipement électronique complexe est alimenté par l'énergie solaire. (Anglo American Corporation)

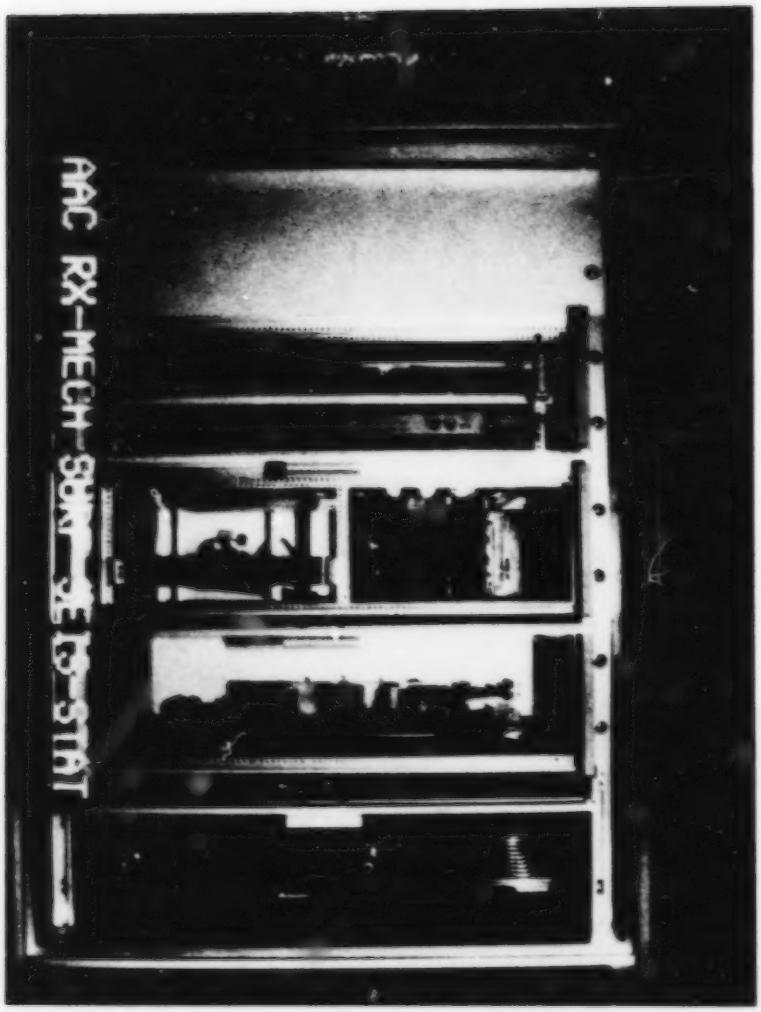


Figure 12. Matériel microsismique : processeur de signaux analogiques, convertisseur analogique-numérique, microprocesseur, radio-émetteur et alimentation en électricité.

cinq d'entre eux sont alimentés par de l'énergie solaire. Les installations de géophones intermédiaires, profonds et de surface sont pratiquement les mêmes, sauf que les géophones de surface ont une fréquence plus faible, car ce sont des capteurs de vitesse de 4,5 Hz. La Chamber of Mines recommande que ces capteurs soient aussi utilisés dans les installations souterraines. Cependant, dans le système de Klerksdorp, les capteurs de vitesse souterrains sont des géophones HS-J de 14 Hz. Il existe aussi des géophones de 2 Hz pour les installations de surface.

Dans le système actuel tous les géophones sont triaxiaux; cependant, étant donné les limitations de traitement, on ne surveille qu'un composant de ces géophones triaxiaux. Les signaux sont envoyés vers la surface sous forme de signaux à modulation de fréquence à l'aide de trois fréquences porteuses qui sont : 1875 Hz, 3125 Hz et 4000 Hz. Les signaux sont superposés et envoyés vers un émetteur UHF qui ne peut pas transmettre de signaux d'une fréquence nettement supérieure à 4000 Hz.

Le système d'observations macrosismiques couvre une superficie de quelque 300 km^2. Dans le système de la région de Klerksdorp, les géophones sont installés surtout dans le massif de protection de puits pour des raisons d'entretien et de protection. On a constaté que si les géophones sont installés trop loin, des pannes, etc., se produisent et il est très difficile de retrouver et de remettre en état le géophone. Dans le système existant, la majeure partie des géophones fonctionnent généralement la plupart du temps. Les signaux sont transmis du sous-sol par des câbles dans le puits vers un émetteur UHF. Le récepteur des signaux UHF est installé dans le puits Marguerite. Des géophones ont été installés dans des trous de sonde de 30 mètres, au toit et au mur afin d'obtenir une couverture à trois dimensions. La précision de la localisation des foyers dans le système macrosismique est de 60 à 100 mètres.

On a effectué quelques tirs d'étalonnage et on a obtenu une précision de l'ordre de 2,5 mètres dans le plan XY ou horizontal et de l'ordre de 5 mètres dans le plan vertical du réseau macrosismique. Pendant les tirs d'étalonnage, il a été possible de déterminer une différence entre les vitesses en avant et en arrière du front de taille. La vitesse semble varier entre environ

3 kilomètres par seconde et 6 kilomètres par seconde. Ces études indiquent que la structure et les fractures du terrain peuvent avoir une influence importante sur la qualité du signal.

La Chamber of Mines a observé que les éclairs créent des problèmes dans la transmission UHF ce qui peut mener à un déclenchement continu de signaux. Elle utilise un magnétophone multicanal comme installation de secours et espère pouvoir ne plus s'en servir d'ici deux ans. La Chamber of Mines a l'intention d'étalonner bientôt une nouvelle fois tout son système. Elle recommande que les tirs d'étalonnage soient faits assez souvent. Les grandes manifestations ont tendance à saturer les amplificateurs et d'après la Chamber on peut pallier cette difficulté en utilisant deux canaux d'amplification présentant des gains très différents.

La Chamber of Mines n'a observé aucun changement systématique dans les erreurs relevées dans les résultats de géophones particuliers en fonction du temps, ce qui laisse supposer un changement de la vitesse en fonction du temps, en d'autres termes, la Chamber of Mines n'a aucun phénomène qui laisse supposer un changement dans la nature fondamentale de la masse rocheuse avec le temps.

D'après la Chamber of Mines, le système en service a deux objectifs : le premier concerne la direction et le second la recherche. Elle a constaté que la direction s'intéresse à la localisation des structures dangereuses et à la quantité d'énergie sismique libérée. La région de Klerksdorp a tendance à avoir plus de manifestations de grande magnitude que les autres régions. La limite inférieure du système correspond à environ une magnitude de 0,5 dans l'échelle de Richter. La Chamber of Mines a signalé qu'elle peut détecter des signaux inférieurs à une magnitude de 1 mais qu'elle doit deviner la magnitude de ces signaux.

Le système (Fig. 13) possède un simulateur de manifestations qu'on peut utiliser pour tester un nouveau logiciel. Ce simulateur permet à la Chamber de mettre au point un nouveau logiciel sans attendre des manifestations réelles, et introduit un temps de retard et un signal sinusoïdal avec amortissement sur n'importe lequel des dix canaux choisis. La Chamber of Mines a un enregistreur graphique de sismogrammes. Cependant, étant donné le coût du

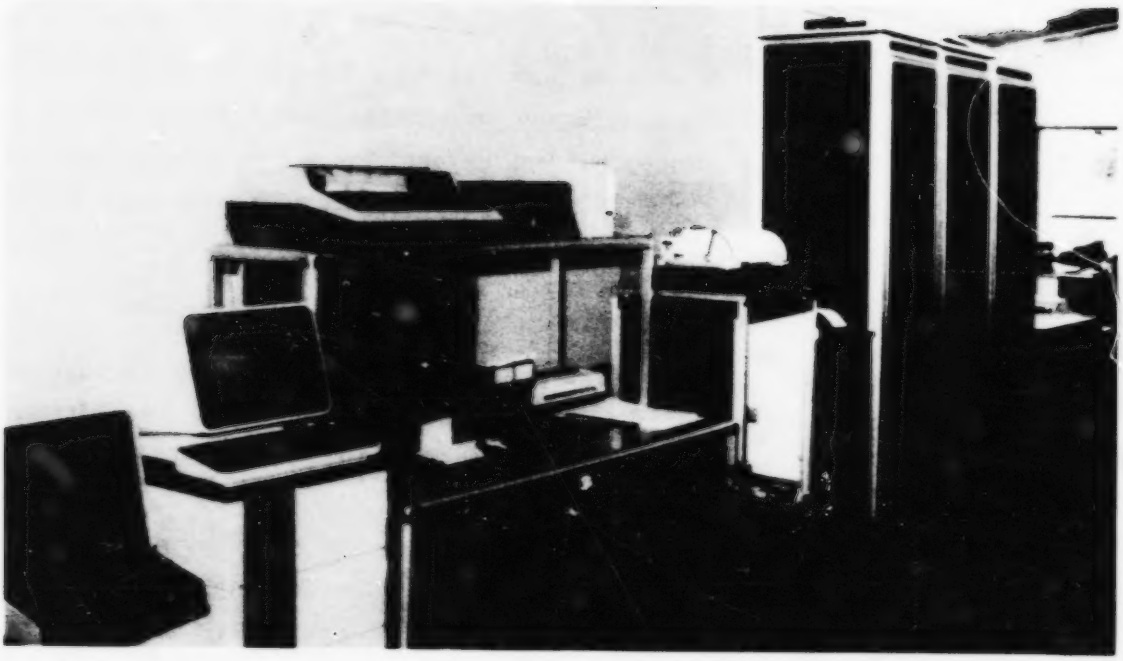


Figure 13. Système macrosismique de la Chamber of Mines installé dans la mine Stilfontein dans la région de Klerksdorp.

papier enregistreur thermosensible, elle trouve que la gestion de ce système est coûteuse. Si une manifestation importante se produit, les deux ou trois premiers signaux sont lisibles après quoi il est très difficile de distinguer quoi que ce soit dans le chevauchement des traces de l'enregistreur de diagrammes.

On utilise un sismogramme de surface pour faire la corrélation avec le réseau sismique national. Ce sismogramme donne un enregistrement graphique pendant 24 heures par jour. Le géophone, qui est un appareil à axe unique, vertical, de 1 Hz, est installé à quelque 15 mètres à l'intérieur du socle et est enterré dans 2 mètres cubes de béton au fond d'un trou de sonde de 22 mètres. La gamme de cette unité varie entre 0,2 Hz et 5 Hz.

Les plus grandes manifestations de la région de Klerksdorp, dont la magnitude varie entre 4 et 5, sont distinctement ressenties en surface. Des bâtiments subissent aussi des dégâts superficiels importants, certains même doivent être détruits et reconstruits.

On a utilisé un matériau de revêtement conforme, Dow Corning, sur toutes les cartes de circuits imprimés qu'on envoie dans le sous-sol. On a constaté plus tard que la Chamber of Mines a tendance à employer une partie non négligeable d'information dans les stations souterraines. Une nouvelle station souterraine caractéristique d'un site de puits, comprend un convertisseur analogique-numérique, une carte de déclenchement, une carte RAM, une carte d'une unité centrale, une carte de communications, ainsi qu'une alimentation en électricité. Ces composants sont installés dans des boîtes de 10 pouces sur 4 pouces placées à l'intérieur de grandes armoires scellées, faites d'acier inoxydable. Le coût est de l'ordre de 4 000 $ par canal, du côté du capteur. Les stations de surface de la région de Klerksdorp sont les mêmes que les stations de surface de Welkom.

La mine de Vaal Reef qui appartient à l'Anglo American se trouve à l'intérieur du réseau macrosismique de Klerksdorp; on y utilise un réseau microsismique sur un secteur de 400 m^2. Ce réseau comprend 16 géophones triaxiaux servant à

localiser les foyers. Le but est de localiser les manifestations microsismiques sans enregistrer de sismogrammes. Dans ce système les géophones sont du type HS-J qui fonctionnent entre 14 Hz et quelques centaines de hertz. La capacité de traitement du système est de l'ordre de 3 secondes, ce qui permet de localiser une manifestation toutes les trois secondes. Pendant les deux dernières années, on a pu localiser environ 144 000 manifestations, dont 85 % provenaient d'explosions. Les magnitudes des manifestations microsismiques varient entre -0,2 et environ 0 dans l'échelle de Richter.

La Chamber of Mines prévoit l'installation d'un nouveau réseau dans un autre secteur de la zone minière. Ce nouveau réseau comptera 13 nouvelles stations de géophones. Sept de ces stations seront souterraines et six en surface. Elle prévoit une certaine augmentation de la densité des géophones dans des zones particulières de forte sismicité et une meilleure couverture verticale grâce au nouveau réseau. Tous ces changements se traduiront naturellement par de nouveaux problèmes d'entretien.

La région à étudier aura sept canaux au 66^{e} niveau, neuf au 68^{e} et un à environ 40 mètres au-dessus du 66^{e} niveau, dans le centre du réseau. Les géophones seront installés dans des trous de 6 mètres de profondeur. La Chamber of Mines a proposé que la profondeur du trou nécessaire soit suffisante pour dépasser la zone fracturée superficielle. Plus les géophones sont profonds et moins le bruit de surface apparaît. En règle générale, la profondeur du géophone doit être deux fois le diamètre du tunnel. Le nouveau réseau aura des géophones triaxiaux. Les localisations se feront dans le sous-sol. Le microprocesseur dans le sous-sol sera utilisé pour la vérification de la conversion analogique-numérique, etc., et pour la transmission à un processeur principal souterrain. Les algorithmes de localisation calculés par Wiebols et Salamon seront utilisés. Ces algorithmes donnent l'écart de XY et de Z. Toute manifestation est rejetée si l'écart moyen est supérieur à 20 m. Les sismogrammes des manifestations qu'on garde seront alors envoyés à la surface où l'on effectuera des vérifications plus précises des temps d'arrivée de P et de S.

Avec ce nouveau système, lorsque la collecte des sismogrammes complets sera en cours, le temps de transmission des sismogrammes sera d'environ

20 secondes. En d'autres termes, pendant cette période, on ne pourra recueillir ni localiser d'autres manifestations. Pour pallier ce retard, chaque géophone triaxial possède un petit processeur central incorporé qui peut stocker quelques manifestations alors que le processeur principal transmet les données. En outre, pendant les explosions on localisera uniquement les foyers et on n'essayera de garder aucun sismogramme complet. On prévoit aussi ne garder que des sismogrammes qui se rapportent à des manifestations plus grandes qu'une manifestation d'une certaine importance, ou qui peut-être sont fondés sur la durée des manifestations.

Dans le nouveau système proposé on se servira des mêmes techniques matérielles de saisie de manifestations utilisées dans l'ancien système décrit antérieurement. Il a été conçu pour effectuer une localisation préliminaire du foyer dans le sous-sol. Si on juge que la localisation du foyer est acceptable (c'est-à-dire qu'elle présente un écart beaucoup plus petit), alors le système recueillera les sismogrammes complets à partir des stations périphériques. Ces sismogrammes serviront à sélectionner les temps d'arrivée de P et S, si le temps le permet, en surface. La Chamber of Mines a signalé qu'elle essayera probablement d'utiliser une technique de saisie automatique qui sera vraisemblablement fondée sur l'énergie.

9. Réunion à la mine West Driefontein du Goldfields Group, Afrique du Sud

Réunion avec Kevin Reimer, Martyn Jones et Wickus Saayman.

Dans la mine West Driefontein, on a exploité le filon-guide de charbon et les zones des filons VCR. Le réseau dans cette région est plus récent que la plupart des autres réseaux. Lorsqu'on exploite les filons VCR, il se produit des coups de toit d'une magnitude qui varie entre 2 et 4. La localisation de ces manifestations est importante pour un sauvetage éventuel, la planification de l'exploitation minière, etc. Le réseau sismique était à l'origine destiné uniquement à la mine West Driefontein, mais on a décidé alors de l'étendre à tout le Goldfields Group dans cette région; pour cela, on a opté pour un système central qui devait couvrir huit mines. Voici les objectifs de ce système :

a) Fournir rapidement la localisation des foyers;
b) Planifier l'exploitation minière, si on observe un groupe de manifestations dans des localisations particulières, on peut alors prévenir la direction et prendre les mesures appropriées;
c) Effectuer une recherche détaillée à long terme sur la fréquence, la magnitude, etc., des manifestations.

La couverture du secteur par ce système est très grande, 26 kilomètres environ d'un bout à l'autre et elle comprend presque 8 mines. Le système compte 4 sites éloignés, un à la mine Koof, et un autre aux mines West Driefontein et Doornfontein. On prévoit une mine supplémentaire pour l'année prochaine. Au début, il n'y avait que quatre personnes pour gérer ce système; actuellement ce nombre est passé à six, mais le personnel est toujours insuffisant pour la taille du système utilisé.

On se sert de géophones de mesure de vitesse, à capteurs verticaux de 4,5 Hz, unidirectionnels. On trouve quelques géophones triaxiaux, généralement un par mine, dont on se sert pour déterminer la magnitude des manifestations et pour calculer le moment sismique, etc. Les géophones sont placés dans des trous de 3 mètres de profondeur ce qui permet de s'éloigner des zones fracturées proches de la surface. Ils sont généralement fixés avec de l'époxy sur la paroi supérieure des trous. On ne prend aucune précaution spéciale; des amplificateurs sont placés à l'entrée du trou de sonde. La distance maximale entre le géophone et l'amplificateur est de 100 mètres, cependant, elle peut souvent être inférieure à 10 mètres. Le système a été conçu par Rod Green du BPI et on utilise des amplificateurs logarithmiques. Selon les techniciens de la mine de West Driefontein, l'amplificateur logarithmique constitue le coeur du système, car il donne une gamme dynamique très étendue, allant de valeurs négatives de la magnitude dans l'échelle de Richter à la valeur +4.

On utilise la transmission par radio entre les sites éloignés et le système de traitement central (Figure 14). Les sites éloignés permettent au groupe d'utiliser des localisations par rapport à différentes mines et de localiser des manifestations situées à l'extérieur du système de géophones avec plus de

précision. Ils ont des microprocesseurs 16 bits. Ces processeurs enregistrent les signaux qu'ils stockent sur un disque et transmettent aussi vite que possible à l'aide de fréquences UHF vers l'unité centrale. Les radios fonctionnent à 40 kilobaud. En outre, chaque site éloigné possède un disque de 10 méga-octets : cinq sur disques durs et cinq sur disques amovibles. Cependant, le groupe a des difficultés car il s'aperçoit que la transmission des localisations perturbe l'analyse des données sur les microprocesseurs 16 bits. Le processeur central est un ordinateur 32 bits. Chaque microprocesseur 16 bits installé dans les sites éloignés possède deux cartes A/N et enregistre 24 heures par jour. L'échantillonnage se fait approximativement à la fréquence de 1 kHz, avec un maximum de 32 canaux. Actuellement, West Driefontein a 26 canaux, Koof 16 et Doornfontein 12. Dans les mines d'East et West Driefontein, le système s'étale verticalement sur quelque 1 000 m.

On utilise un matériel de déclenchement et chaque déclencheur est lié à quatre géophones. Idéalement, ces quatre géophones sont les premiers à percevoir une manifestation.

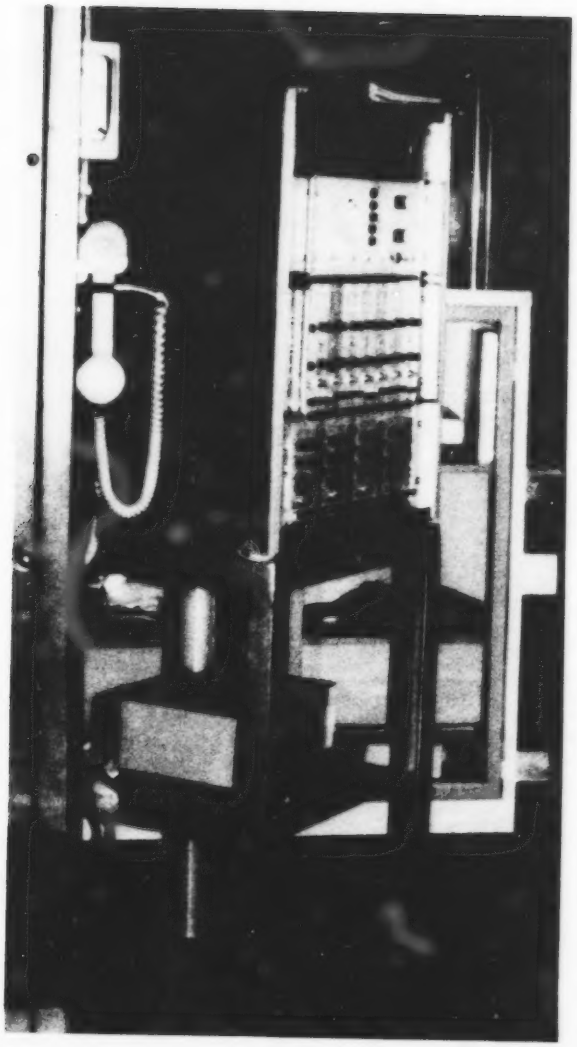


Figure 14. Station de radiotélémétrie faisant partie du réseau sismique de la mine West Driefontein.

Bibliographie

1. Green, R.W.E., Design Considerations for an Underground Seismic Network - Proceedings of the 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity in Mines. Johannesburg, 1982. SAIMM. Johannesburg 1984.

2. Spottiswoode, S.M., Automatic Selection of P and S Wave Arrivals. Schematic Version of Algorithm in Use at Blyvooricht Gold Mine. Données recueillies par W. Bawden (Centre de Recherche Noranda) au cours de sa visite en Afrique du Sud, décembre 1985.

3. Hanks, T.C., Arms and Seismic Source Studies. Proceedings of the 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity in Mines. Johannesburg, 1982. SAIMM. Johannesburg 1984.

4. Spottiswoode, S.M., Underground Seismic Networks and Safety. Symposium on Monitoring for Safety in Geotechnical Engineering. International Society for Rock Mechanics, S.A. National Group, Johannesburg, août 1984.

5. Scheepers, J.B., The Klerksdorp Seismic Network: Monitoring of Seismic Events and Systems Layout. Proceedings of the 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity in Mines. Johannesburg, 1982. SAIMM. Johannesburg 1984.

6. McGarr, A., Some Applications of Seismic Source Mechanism Studies to Assessing Underground Hazard. Proceedings of the 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity in Mines. Johannesburg, 1982. SAIMM. Johannesburg 1984.

7. Salamon, M.D.G. et Wiebols, G.A., Location of Seismic Events. Chamber of Mines of South Africa, Research Organizations. C.O.M. Reference - Project No. 1/134/70, Research Report No. 18/72.

8. Eccles, C.D. et Ryder, J.A., Seismic Location Algorithms: A Comparative Evaluation. Proceedings of the 1st International Congress on Rockbursts and Seismicity in Mines. Johannesburg, 1982. SAIMM. Johannesburg 1984.

9. Solms, R.L. de G., Shaft Design for Western Deep Levels No. 1 Shaft Association of Mine Managers of South Africa, Chamber of Mines, Documents et discussions 1982-1983.

10. Electrolab, Spokane, Washington, É.U. Feuilles de données sur le système envoyées à O. Momoh, Centre de Recherche Noranda, le 3 sept. 1984.